



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE
CONCRETOS PRODUZIDOS COM VIDRO MOÍDO**

Daniel Vian

Lajeado, julho de 2018

Daniel Vian

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM VIDRO MOÍDO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas da Universidade do Vale do
Taquari - Univates, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ma. Débora Pedroso Righi

Lajeado, julho de 2018

Daniel Vian

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM VIDRO MOÍDO

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Ma. Débora Pedroso Righi – Orientadora
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dra. Betina Hansen
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos
Universidade do Vale do Taquari

Lajeado, julho de 2018

AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho à minha mãe, que jamais mediu esforços para me apoiar financeiramente, muitas vezes abrindo mão de seus desejos para que hoje eu pudesse estar concretizando o meu sonho. Obrigado mãe por todo apoio, dedicação e carinho, você é minha base e o motivo de eu estar realizando esse projeto.

Agradeço à minha tia Maria Elite, minha segunda mãe, por todo carinho e amor que sempre teve com toda a família e principalmente comigo. Muito do que sou hoje devo a você que também sempre me apoiou e torceu por mim. Muito obrigado por tudo.

Minha imensa gratidão à professora Ma. Debora Pedroso Righi por todo apoio e dedicação ao orientar esse projeto, sempre disposta a passar seu conhecimento e auxiliar em dificuldades que surgiram durante a elaboração desta pesquisa. Minha extrema admiração por seu compromisso com o ensino e sua força de vontade, mantendo-se firme na orientação deste projeto apesar dos percalços da vida. Você é vitoriosa.

Agradeço as colegas Carolina e Mirela que também são orientadas pela Ma. Débora, pela ajuda na realização conjunta de ensaios de caracterização de materiais realizados no LATEC.

Por fim, agradeço ao Viane e Rodrigo, funcionários do LATEC, pelo auxílio em todas as vezes que me foi necessário utilizar o laboratório, assim como na moldagem dos corpos de prova e realização de ensaios.

RESUMO

Atualmente, é crescente a busca por soluções que amenizem a degradação e agressão ao meio ambiente causadas pelas ações do homem. Neste sentido, a construção civil tem procurado alternativas sustentáveis de reutilização e substituição de materiais tradicionais na composição de suas argamassas e concretos pela adição de resíduos recicláveis. O vidro é um material totalmente reciclável que vem sendo estudado como substituto de componentes em diversas aplicações, como no concreto. Garrafas de cerveja do tipo *long-neck* não são retornáveis, nem recolhidas para reciclagem, sendo destinadas a aterros sanitários. Com o intuito da reutilização deste tipo de garrafas, foi realizada a coleta deste material em uma casa de eventos para a realização desta pesquisa que teve como objetivo analisar o comportamento mecânico e a durabilidade de concretos com a adição de vidro moído, como substituto do agregado miúdo. A pesquisa contemplou os ensaios de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral, corrosão por íons cloretos, capilaridade, absorção e índice de vazios. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura com traços de 0%, 10%, 20% e 30% de substituição parcial da areia por vidro moído submetidos a ensaios nas idades de 7, 14, 28 e 70 dias. Os resultados encontrados mostram que a substituição parcial de areia pelo vidro moído nas proporções analisadas de uma maneira geral pode ser uma posição viável na construção civil, sendo que o traço de 30% foi o que obteve maior destaque entre os demais se tornando uma possibilidade para que este tipo de resíduo tenha uma destinação mais sustentável.

Palavras-chave: Soluções sustentáveis. Vidro moído. Concreto. Resistência à compressão.

ABSTRACT

Nowadays, the search for solutions that lessen the aggression and degradation of the environment caused by human actions is increasing. In this sense, civil construction has sought sustainable alternatives of reuse and replacement of traditional materials in the composition of its mortars and concretes by the addition of recyclable waste. Glass is a fully recyclable material that has been studied as a substitute for components in various applications, such as concrete. Long-neck beer bottles are not returnable nor collected for recycling and are taken to sanitary landfills. With the purpose of reusing this type of bottles, the material was collected in an event area for the accomplishment of this research that aimed to analyze the mechanical behavior and the durability of concrete with the addition of ground glass, as substitute for the finely ground aggregate. The research consisted of tests of resistance to simple compression, resistance to traction by diametral compression, corrosion by chloride ions, capillarity, absorption, and void index. Cylindrical test specimens of 10 cm in diameter and 20 cm in height with traces of 0%, 10%, 20% and 30% of partial replacement of sand by ground glass were molded and submitted to trials at the ages of 7, 14, 28 and 70 days. The results obtained show that the partial substitution of sand by ground glass in the proportions analyzed, in a general way, can be a viable position in the civil construction, the 30% trait was the one that obtained greater prominence among the others becoming a possibility for this type of waste to have a more sustainable destination.

Keywords: Sustainable solutions. Ground glass. Concrete. Resistance to compression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de fabricação do vidro.....	22
Figura 2 - Variedades de vidros	23
Figura 3 - Vidro temperado após ser quebrado.....	25
Figura 4 - Vidro laminado quebrado	26
Figura 5 - Ciclo do vidro	27
Figura 6 - Garrafa <i>long-neck</i> de 355 ml.....	28
Figura 7 - Aterro sanitário de garrafas.....	28
Figura 8 - Moldagem de garrafas de vidro	30
Figura 9 - Programa Experimental	38
Figura 10 - Despejo da areia no recipiente cilíndrico	41
Figura 11 - verificação da condição de saturação de superfície seca da areia.	42
Figura 12 - Areia em estado saturado com superfície seca	42
Figura 13 - Conjunto frasco aferido + amostra	43
Figura 14 - Amostra de areia após secagem em estufa.....	43
Figura 15 - Agitador mecânico de peneiras.....	45
Figura 16 - Despejo da brita no recipiente cilíndrico	47
Figura 17 - Amostra de brita.....	48
Figura 18 - Secagem da amostra de brita	49
Figura 19 - Massa do agregado saturado superfície seca	49
Figura 20 - Massa do agregado em água	50
Figura 21 - Agitador mecânico de peneiras.....	51
Figura 22 - Garrafas do tipo <i>long-neck</i>	54
Figura 23 - Garrafa <i>long-neck</i> higienizada	55

Figura 24 - Garrafa previamente quebrada	55
Figura 25 - Moinho mecânico de bolas	56
Figura 26 - Vidro moído.....	56
Figura 27 - Agitador mecânico de peneiras.....	57
Figura 28 - Vidro moído separado por granulometrias	57
Figura 29 - Materiais utilizados para ensaio de massa específica do vidro moído....	59
Figura 30 - Adição de querosene no frasco de Le Chatelier	59
Figura 31 - Adição de vidro moído no frasco.....	60
Figura 32 - <i>Slump test</i>	62
Figura 33 - Abatimento do concreto	63
Figura 34 - Moldes cilíndricos para corpos de prova	63
Figura 35 - Moldagem dos corpos de prova	64
Figura 36 - Ruptura de corpos de prova à compressão axial.....	64
Figura 37 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	65
Figura 38 - Divisão de corpos de prova para ensaios de cloretos.....	66
Figura 39 - Corpos de prova fracionados	67
Figura 40 - Impermeabilização das amostras.....	67
Figura 41 - Solução com 3% de cloretos.....	67
Figura 42 - Ruptura das amostras de cloretos	68
Figura 43 - Absorção de água por capilaridade.....	69
Figura 44 - Imersão de corpos de prova por 72 horas	70
Figura 45 - Fervura de amostras	70
Figura 46 - Registro de massa da amostra submersa.....	71
Figura 47 - Amostra na condição saturada	71
Figura 48 - Ataque de cloretos nas amostras.....	79
Figura 49 - Perfil de cloretos traço REF.	80
Figura 50 - Perfil de cloretos traço 10%	80
Figura 51 - Perfil de cloretos traço 20%	81
Figura 52 - Perfil de cloretos traço 30%	81
Figura 53 - Ascensão capilar interna Traço REF.....	84
Figura 54 - Ascensão capilar interna traço 10%.....	84
Figura 55 - Ascensão capilar interna traço 20%.....	85
Figura 56 - Ascensão capilar interna traço 30%.....	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Atividade pozolânica de cinzas volantes e vidro.....	32
Gráfico 2 - Teste compressão traço de referência	33
Gráfico 3 - Teste compressão com 50% de vidro moído.....	34
Gráfico 4 - Evolução de resistência do concreto	34
Gráfico 5 - Resultados teste de compressão.....	36
Gráfico 6 - Curva granulométrica areia, vidro moído e brita	36
Gráfico 7 - Curva granulométrica da areia	46
Gráfico 8 - Curva granulométrica com zonas utilizáveis da brita 1	53
Gráfico 9 - Granulometria do vidro moído	74
Gráfico 10 - Resistência à compressão simples.....	76
Gráfico 11 - Resultado de resistência à tração.....	78
Gráfico 12 - Profundidade de penetração de íons cloretos	82
Gráfico 13 - Curva de absorção de água por capilaridade	83
Gráfico 14 - Absorção do concreto.....	86
Gráfico 15 - Índice de vazios	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de vidros	21
Tabela 2 - Comparativo de propriedades do RVL com NBR 12653	32
Tabela 3 - Índice pozolânico.....	33
Tabela 4 - Traços de substituição de areia por vidro moído.....	35
Tabela 5 - Composição cimento.....	39
Tabela 6 - Distribuição granulométrica da areia	45
Tabela 7 - Zona utilizável da areia	46
Tabela 8 - Distribuição granulométrica da brita	52
Tabela 9 - Zona utilizável da brita	52
Tabela 10 - Traço unitário determinado para a pesquisa	61
Tabela 11 - Traço em massa para confecção de corpos de prova.....	61
Tabela 12 - Distribuição granulométrica do vidro moído	74
Tabela 13 - Abatimento dos traços.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	Micrometros
ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm^3	Centímetros cúbicos
CP	Cimento <i>Portland</i>
DMC	Diâmetro máximo característico
g	Gramas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
kg	Quilogramas
kN	Unidade de medida de força, Quilonewtons
LATEC	Laboratório de Tecnologias de Construção
m^3	Metros cúbicos
MF	Módulo de finura
MPa	Unidade de medida de força, Mega Pascal

NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RVL	Resíduo de vidro laminado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo geral	16
1.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Justificativa.....	17
1.4 Delimitação do tema	18
1.5 Estrutura de pesquisa.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Aspectos gerais do vidro.....	20
2.1.1 Processo de produção.....	21
2.1.2 Tipos de vidros	22
2.1.2.1 Vidro <i>float</i>.....	23
2.1.2.2 Vidro impresso	24
2.1.2.3 Vidro Aramado.....	24
2.1.2.4 Vidro temperado	24
2.1.2.5 Vidro Laminado	25
2.2 Reciclagem do vidro	26
2.3 Vidro para produção de garrafas	29
2.4 Utilização do vidro moído no concreto	30
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1 Materiais.....	39
3.1.1 Cimento	39
3.1.2 Areia	40

3.1.2.1 Determinação da massa unitária e massa específica da areia.....	40
3.1.2.2 Determinação da granulometria da areia	44
3.1.3 Brita	46
3.1.3.1 Determinação da massa unitária e massa específica da brita	47
3.1.3.2 Determinação da granulometria da brita.....	51
3.1.4 Água de amassamento	53
3.1.5 Aditivo superplastificante.....	53
3.1.6 Vidro Moído.....	54
3.1.6.1 Moagem do vidro.....	55
3.1.6.2 Determinação da granulometria do vidro moído	56
3.1.6.3 Determinação da massa unitária e massa específica do vidro moído ...	58
3.1.7 Dosagem	60
3.2 Concreto.....	61
3.2.1 Concreto no estado fresco	62
3.2.1.1 <i>Slump Test</i>	62
3.2.1.2 Moldagem de corpos de prova.....	63
3.2.2 Ensaios para concreto no estado endurecido	64
3.2.2.1 Resistência à compressão simples	64
3.2.2.2 Resistência à tração.....	65
3.2.2.3 Corrosão de íons cloretos	66
3.2.2.4 Capilaridade.....	68
3.2.2.5 Absorção e índice de vazios	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1 Caracterização do vidro moído	73
4.1.1 Granulometria do vidro moído	73
4.1.2 Massa unitária e massa específica do vidro moído	75
4.2 <i>Slump test</i>	75
4.3 Resistência à compressão simples	76
4.4 Resistência à tração por compressão diametral	77
4.5 Corrosão de íons cloretos	79
4.6 Capilaridade.....	82
4.7 Absorção e índice de vazios	86
5 CONCLUSÃO	88

5.1 Conclusões e considerações	88
5.2 Sugestão para trabalhos futuros	89
REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a construção civil vem desempenhando um grande papel com pesquisas direcionadas em tecnologias inovadoras às áreas sustentáveis, visando a reutilização de materiais, que tem como destino normalmente os aterros sanitários. A maioria desses materiais leva centenas e até milhares de anos para serem decompostos pelo meio ambiente, o que acaba gerando um problema não só ambiental, mas também de espaço físico.

No Brasil e no mundo, um dos materiais que vem sendo mais utilizado na construção civil é o concreto. Esse é composto pela junção de aglomerantes, agregados e água, basicamente, e ainda podendo receber adições, de acordo com as propriedades requeridas para o produto (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A produção de concreto pode ser considerada como uma grande indústria de reutilização de resíduos, tendo em vista que aceita em sua composição a incorporação de muitos tipos de resíduos. Muitos desses resíduos, como a sílica, escória, e cinzas, são adicionados ao concreto com o intuito de melhorar suas propriedades mecânicas (BABU e PRAKASH, 1995 *apud* CORDEIRO e MONTEL, 2015).

O vidro tem como suas principais propriedades a dureza e a resistência. Essas propriedades permitem que o material seja empregado nas mais variadas aplicações, desde como elemento na construção civil, como também na indústria de alimentos (CEBRACE, 2017).

Sendo considerado pela ABIVIDRO (2017) como um material 100% reciclável, o vidro possui diversas propriedades mecânicas que estão diretamente ligadas ao concreto. Segundo Nascimento *et al.* (2014) o vidro é constituído por aproximadamente 72% de sílica, sendo composto basicamente por areia.

De acordo com o CEMPRE (2017) o número de embalagens de vidro que são produzidas anualmente no Brasil é cerca de 980 mil toneladas. Nesta produção são reciclados apenas 45% de vidro em forma de cacos, provenientes de refugos de fábricas e vidraçarias, e alguma parte recolhida em coleta seletiva feita pelos municípios. O fato de aproximadamente 55% do vidro não ser reciclado se deve à dificuldade da separação do mesmo em processos de triagem, visto que possui as mais variadas composições, colorações e propriedades.

Visando ajudar na questão do impacto ambiental gerado por resíduo de vidro, assim como por garrafas de vidro do tipo *long-neck* pesquisas já vêm sendo feitas empregando o vidro moído como substituto do agregado miúdo na composição do concreto. Neste trabalho será utilizado o vidro moído oriundo de garrafas de cerveja do tipo *long-neck*, substituindo a areia como agregado miúdo no concreto em diferentes porcentagens. Essa substituição tem a finalidade de realizar teste de durabilidade de concretos fabricados com a adição do vidro moído em forma de areia. Autores como Righi *et al.* (2012) realizaram o teste de resistência do concreto fabricado com adição de vidro moído, após ser submetido à altas temperaturas.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar o uso do vidro moído oriundo de garrafas do tipo *long-neck* em concretos convencionais em diferentes proporções de substituição ao agregado natural.

1.2 Objetivos específicos

- Verificar as características físicas dos agregados utilizados nesta pesquisa;
- Identificar os parâmetros de substituição necessários para o estudo de dosagem com os diferentes teores de substituição da areia por vidro moído em concretos convencionais;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores (0%, 10%, 20% e 30%) de substituição em massa de agregado miúdo por vidro moído;
- Avaliar o concreto em seu estado fresco através dos ensaios de *slump test*;
- Analisar o concreto no estado endurecido através dos ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral;
- Análisar a durabilidade do concreto através dos ensaios de corrosão por íons cloretos, capilaridade, absorção e índice de vazios.

1.3 Justificativa

O vidro é um material que está presente em abundância no mundo. Seus resíduos como cacos, restos de vidraçarias e garrafas não retornáveis são descartados de forma incorreta no meio ambiente.

O concreto, segundo Mehta e Monteiro (2014), é um dos produtos mais fabricados na construção civil. Composto geralmente por cimento, areia, brita e água, é um grande consumidor de matérias primas naturais.

Visto que o vidro pode ser reciclado, já existem pesquisas voltadas à área de utilização do vidro moído como substituinte do cimento ou de agregado miúdo, na composição do concreto. Estudos como o de Ferreira (2015), Fávero (2009), López *et al.* (2005), Pereira (2016) avaliam o desempenho mecânico de concretos fabricados com vidro comum ou de para-brisas moído. Righi *et al.* (2012) inovaram utilizando o vidro moído de garrafas de cerveja do tipo *long-neck* em seu estudo quanto a

resistência do concreto com adição de vidro moído após submetido a altas temperaturas. Os referidos trabalhos não apresentam resultados quanto a durabilidade dos concretos com adição do vidro moído.

1.4 Delimitação do tema

Esta pesquisa estará delimitada ao uso de garrafas do tipo *long-neck* exclusivamente da cor marrom de uma determinada fabricante de cervejas, visto que as propriedades podem variar de acordo com o tipo de fabricação. Ainda está delimitada ao uso do cimento CP V – ARI, a um único tipo de aditivo superplastificante, bem como ao uso de materiais como agregados que são oriundos da região do Vale do Taquari e serão obtidos no Laboratório de Tecnologias da Construção – LATEC da Universidade do Vale do Taquari.

1.5 Estrutura de pesquisa

A pesquisa foi dividida em seis capítulos. O primeiro está destinado à introdução dos assuntos que foram abordados na pesquisa, justificativas, objetivo geral e objetivos específicos, bem como as delimitações do trabalho.

A revisão bibliográfica compreende o capítulo dois, onde são abordados conceitos de alguns autores quanto ao vidro, suas características, composição, fabricação e tipos existentes. Ainda são abordadas considerações de reciclagem, e fabricação de garrafas de cerveja, bem como a utilização do vidro moído junto ao concreto.

O capítulo três está restrito a descrição dos processos que foram realizados para chegar aos resultados e materiais esperados, bem como os testes que foram realizados e seus procedimentos. Este capítulo apresenta ainda um programa experimental da sequência dos procedimentos.

No capítulo quatro é apresentado os resultados de todos os ensaios realizados para o concreto durante a pesquisa e discussões a cerca dos valores encontrados;

As conclusões referentes a pesquisa estão apresentadas no capítulo cinco;

As referências bibliográficas buscadas na elaboração desta pesquisa são apresentadas no capítulo seis deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais do vidro

O vidro é um material que vem sendo produzido há séculos, ligado diretamente com a história da humanidade. Sua composição básica é areia, cal e substância alcalina (MAXIMO, 2016). A origem do vidro não é bem precisa, e segundo Westphal (2016), estudos mostram que desde a Mesopotâmia, em torno do século 5º a.C., artefatos cerâmicos já eram vitrificados. No Egito, resquícios de vidros encontrados e datados do ano de 3.500 a.C., marcam o início intencional de fabricar-se o vidro. Vidros moldados em tigelas, começam a aparecer a partir do século 2º a.C.

De acordo com C. Barry Carter (2014), textos históricos escritos por volta de 650 a.C., e encontrados da biblioteca do rei Assírio Ashurbanipal, apresentam a composição e dosagem para a fabricação do vidro. Para a produção deveria ser utilizado 60 partes de areia, 180 peças de algas marinhas e 5 partes de giz, mais conhecido como carbonato de cálcio. Ainda, conforme a ANAVIDRO (2013), o vidro pode ser formado naturalmente por fenômenos da natureza. Quando a areia, rica em sílica e quartzo, é atingida por um raio que ultrapassa 1800°C, ocorre o derretimento e a fundição dos materiais presente nela, resultando em uma estrutura de vidro.

O vidro pode se apresentar em diversas aplicações, podendo ser facilmente encontrado no nosso cotidiano inserido em esquadrias, construções e ainda em infinitos tipos e modelos de artefatos. De acordo com Silva *et al.* (2013) o vidro é duro e rígido, apresentando alta resistência à ruptura, de forma que pode ser aplicado até mesmo como pisos. No entanto não é recomendado para locais sujeitos a impactos, por ser um material frágil e não tenaz.

A composição do vidro apresenta grande variedade de componentes químicos, podendo ser adicionado a ele basicamente todos os elementos presentes na tabela periódica. A classificação do vidro se dá de acordo com a sua composição química, que é o que vai determinar as suas propriedades térmicas, mecânicas, químicas, óticas e elétricas (MAXIMO, 2016). Na Tabela 1 é observada a composição química de vidro, conforme sua utilização.

Tabela 1 - Composição química de vidros

Tipo/Composição	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	PbO	Uso
Sodo-cálcicos	72	2	0	12,5	1	11	1,5	-	Embalagem
	71	1	-	13,5	0,5	10	4	-	Plano
	73	1	-	16,5	0,5	5	4	-	Lâmpada
Borossilicato	79	2	13	5,5	-	-	-	-	Utensílio refratário
	66	1,5	3,5	15,5	1	8	4	-	Fibra isolante
Chumbo	56	-	-	4	12	2	2	24	Vidro cristal
	63	1	-	8	6	-	-	22	Néon
	32	-	-	1	2	-	-	65	Lente
Aluminoborossilicato	72	6	11	7	1	1	-	-	Farmacêutica
	55	15	7	-	-	19	4	-	Fibra de reforço
	62	17	5	1	-	8	7	-	Tubo de combustão

Fonte: Alkeman *apud* Maximo (2016, p. 6).

De acordo com Pinto-Coelho (2009), os vidros sodo-cálcicos ganham destaque por apresentarem grande utilização. Sua produção é feita com a incorporação de óxidos alcalinos, óxido de cálcio (CaO), e óxido de magnésio (MgO), que reduzem a viscosidade do vidro fundido de sílica, e desta forma permite que do material resultante seja fabricado garrafas, bulbos de lâmpadas, frascos e janelas.

Em teoria, o vidro pode ser considerado um material pozolânico, ou seja, um material que tem propriedades cimentantes. Essa propriedade se deve ao fato de o vidro reagir com a presença de água, por ser um material amorfo e apresentar em sua composição alta quantidade de silício e cálcio (LÓPEZ *et al.*, 2005).

2.1.1 Processo de produção

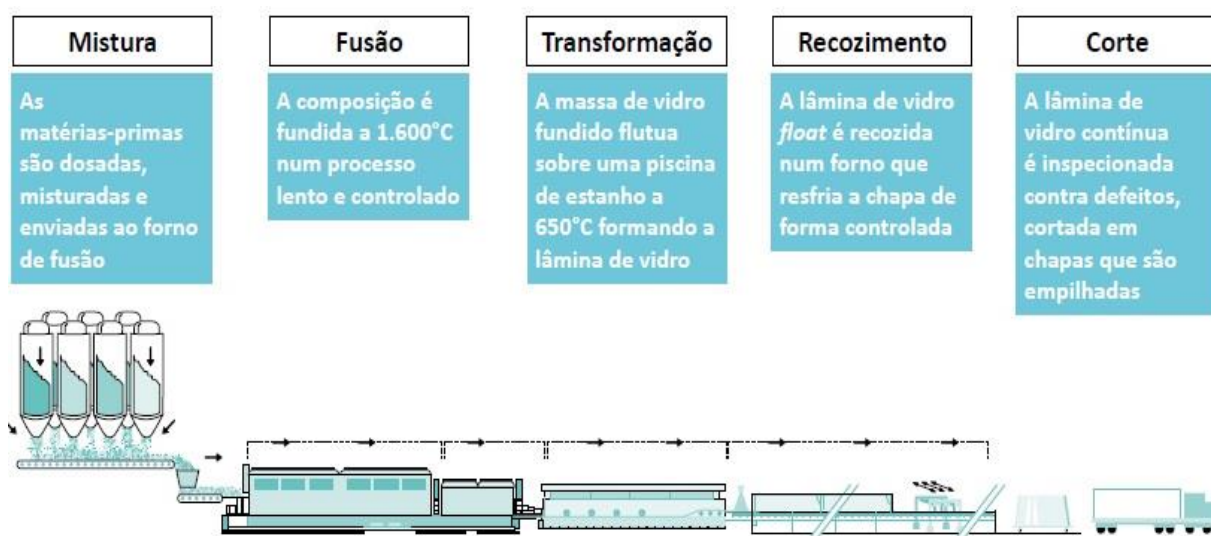
A fabricação do vidro, de acordo com Fávero (2009), resume-se em misturar as matérias primas que o compõem, levando essa mistura à fusão, moldagem, ocorrendo

então o resfriamento e, o beneficiamento. Posteriormente para que sejam aliviadas tensões presentes no material beneficiado, o mesmo é recozido.

O processo de fabricação do vidro (FIGURA 1) começa na extração dos materiais que o compõe, para que as fábricas sejam abastecidas de matéria-prima, e assim posteriormente confeccionarem as chapas de vidro plano, que podem variar de 2 a 25mm. As chapas são produzidas nas cores cinza, verde, bronze e incolor, com dimensões padronizadas (WESTPHAL, 2016).

Após fabricados, os vidros são comercializados para distribuidoras e empresas. As distribuidoras processam e beneficiam o material das mais variadas formas, gerando produtos destinados ao consumidor final.

Figura 1 - Etapas de fabricação do vidro



Fonte: Westphal (2016, p. 20).

2.1.2 Tipos de vidros

Os vidros podem ser classificados, segundo a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano – ABRAVIDRO (2017), de acordo com a sua utilização. Dentre eles tem-se os impressos, laminados, temperados, aramados, entre outros.

De acordo com Westphal (2016) os vidros são classificados de acordo com seu processo de fabricação, sendo que os vidros encontrados no mercado são

apresentados na Figura 2, apresentando uma variedade de combinações de possíveis produtos. Os processos nem sempre são beneficiados em uma mesma processadora, porém alguns tipos de chapas de vidro são padronizados e comercializados desta forma, como é o exemplo dos vidros pintados e laminados.

Figura 2 - Variedades de vidros

Produzidos nas Fábricas	Processados nas Distribuidoras		Vidros Especiais
	Tratamento Superficial	Beneficiamento	
Aramado	Acidado	Curvo	Antibactéria
Controle solar	Jateado	Insulado	Antifogo
Espelho	Pintado a frio	Laminado	Antirrisco
Extra clear	Serigrafado	Temperado	Autolimpante
Float colorido			Blindado
Float incolor			Fotovoltaico
Impresso			
Laminado			

Fonte: Westphal (2016, p. 22).

2.1.2.1 Vidro *float*

Também chamado de vidro plano, pode ser incolor ou colorido e é produzido com a fundição do vidro e solidificação sobre um tanque de estanho líquido. O resultado do processo resulta em grandes placas com ambos os lados planos e paralelos. (BÜNEKER, 2012).

De acordo com Westphal (2016) este tipo de vidro passa por um processo de recozimento de modo que o seu resfriamento seja de forma controlada. Esse processo tem o objetivo de aliviar as tensões residuais oriundas do seu processo de fabricação.

A partir das chapas planas de vidro *float* é possível processar diferentes tipos de vidros. Dentre os vidros fabricados com as chapas de vidro *float* temos o temperado, curvo, serigrafado, laminado, autolimpante entre outros.

2.1.2.2 Vidro impresso

Também podendo ser chamado de vidro fantasia, recebe estes nomes por apresentar em uma ou duas faces impressões de desenhos e ornamentos. Os mais conhecidos são os martelados e canelados, com uma espessura de 4 mm (BÜNEKER, 2012).

De acordo com a NBR NM 297 (ABNT, 2004) as impressões no vidro são feitas através de rolos que comprimem o vidro quando está ainda quente. Os rolos apresentam as mais variadas geometrias como gabarito formando as marcações durante o procedimento de produção.

2.1.2.3 Vidro Aramado

O vidro arramado recebe este nome por possuir em seu interior uma tela metálica, introduzida ainda no processo de fabricação do vidro. Este tipo de vidro é antifogo e proporciona segurança, pois no momento em que for danificado, seus cacos ficam unidos à tela, evitando possíveis acidentes oriundos dos estilhaços (WESTPHAL, 2016).

2.1.2.4 Vidro temperado

Para que seja feita a têmpera de um vidro, ele é aquecido a uma temperatura de 700 °C e então bruscamente resfriado. Este processo faz com que o vidro se torne até cinco vezes mais resistente mecanicamente (PINHEIRO, 2007).

Após feita a têmpera, o vidro (FIGURA 3) não pode receber perfurações e recortes, sendo que deve receber toda a preparação e parte de pré-instalação anteriormente ao processo de tempera (BÜNEKER, 2012).

Figura 3 - Vidro temperado após ser quebrado



Fonte: Abravidro (2017).

2.1.2.5 Vidro Laminado

Segundo Torres (2015), para que um vidro se transforme em laminado, é necessário fazer a união de duas chapas de vidro, por meio de resinas, como polivinil butial, e ainda outros materiais que apresentam propriedade viscoelástica. Este procedimento confia ao material oferecer segurança, pelo fato de seus estilhaços, quando danificado, permanecem unidos pela membrana (BÜNEKER, 2012).

Em guarda-corpos feitos de vidro é necessário seguir normatizações. A NBR 7199 (ABNT, 2016) exige que sejam feitos de vidros laminados (FIGURA 4), e que atendam às exigências da NBR 14697 (ABNT, 2001). (WESTPHAL, 2016).

Figura 4 - Vidro laminado quebrado



Fonte: Clacci Vidros (2017).

2.2 Reciclagem do vidro

Com o objetivo de ter a maior eficiência energética, é realizada a reciclagem de diversos tipos de materiais, dentre eles, o vidro. Além de diminuir a extração de matéria-prima, a reciclagem diminui a quantidade de CO₂ produzida através do transporte de materiais, e ainda evita que os resíduos provenientes do vidro sejam descartados em aterros sanitários. (ADAMS, 2014).

A possibilidade de aproveitamento de um vidro em reciclagem é de 100%, diferentemente de outros tipos de materiais. Desta forma, determinada quantidade de vidro que for reciclado, poderá gerar a mesma quantidade de vidro novo, e com a mesma qualidade. Utilizar 10% de vidro reciclado na produção de um novo, representa uma economia de 4% de energia e ainda a liberação de CO₂ na atmosfera é reduzida em 5% (SILVA *et al.*, 2013).

É produzido anualmente no Brasil em média 980 mil toneladas de vidro destinado às embalagens. Como matéria prima desta produção são utilizados cerca de 4% de vidro reciclado, que provém de coletas seletivas municipais ou ainda de refugos de fábricas ou vidraçarias (CORDEIRO e MONTEL, 2015).

Para López *et al.* (2005), aproximadamente 220 mil toneladas de vidro são recicladas por ano, representando aproximadamente 27% do que é fabricado. Do total produzido, cerca de 3% é descartado no lixo. A reciclagem do vidro é limitada por

alguns fatores como impurezas e mistura de cores, que apresenta dificuldade de separação.

De acordo com Fávero (2009), o vidro é descartado de forma incorreta em aterros sanitários ou depósitos de lixo, pelo fato de apresentar uma massa específica, considerada alta, bem como o considerável custo para o transporte até o local de reciclagem. Na Figura 5 é mostrado como seria o correto ciclo do vidro, desde a sua fabricação, até a sua reciclagem, dando a ele um ciclo infinito.

Figura 5 - Ciclo do vidro



Fonte: Fávero (2009, p. 24).

Os artefatos de vidro oriundos de resíduo caseiro ou comercial, são, segundo Santos (1998), comumente garrafas, objetos quebrados, lâmpadas e vasilhames quebrados. De acordo com Pinheiro (2007) o vidro é muito utilizado como embalagem, e dentre os setores que mais o utilizam para este procedimento está o das bebidas, principalmente as cervejas.

As garrafas de cervejas mais usuais se apresentam em embalagens de 355 ml, mais conhecidas como *long-neck*, de 600 ml, e, mais recentemente, de 1 litro. Dentre essas, a única garrafa que não é do tipo retornável, é a *long-neck* (FIGURA 6).

Figura 6 - Garrafa *long-neck* de 355 ml



Fonte: Pegada de lixo (2017).

Righi *et al.* (2012) apontam que as garrafas de vidro do tipo *long-neck* tem sido um dos resíduos gerados de maior problema no mundo. Isso se deve ao fato de após ter o conteúdo líquido presente da garrafa consumido, a mesma é simplesmente descartada, gerando lixo e ocupando espaço no seu destino final, que geralmente são os aterros sanitários, conforme Figura 7.

Figura 7 - Aterro sanitário de garrafas



Fonte: Mundo Educação (2017).

Santos (1998) estima que cerca de 70% dos aterros existentes terão sua capacidade diminuída dentro dos próximos mil anos. Essa estimativa se deve pelo fato de que o vidro leva cerca de um milhão de anos para se decompor.

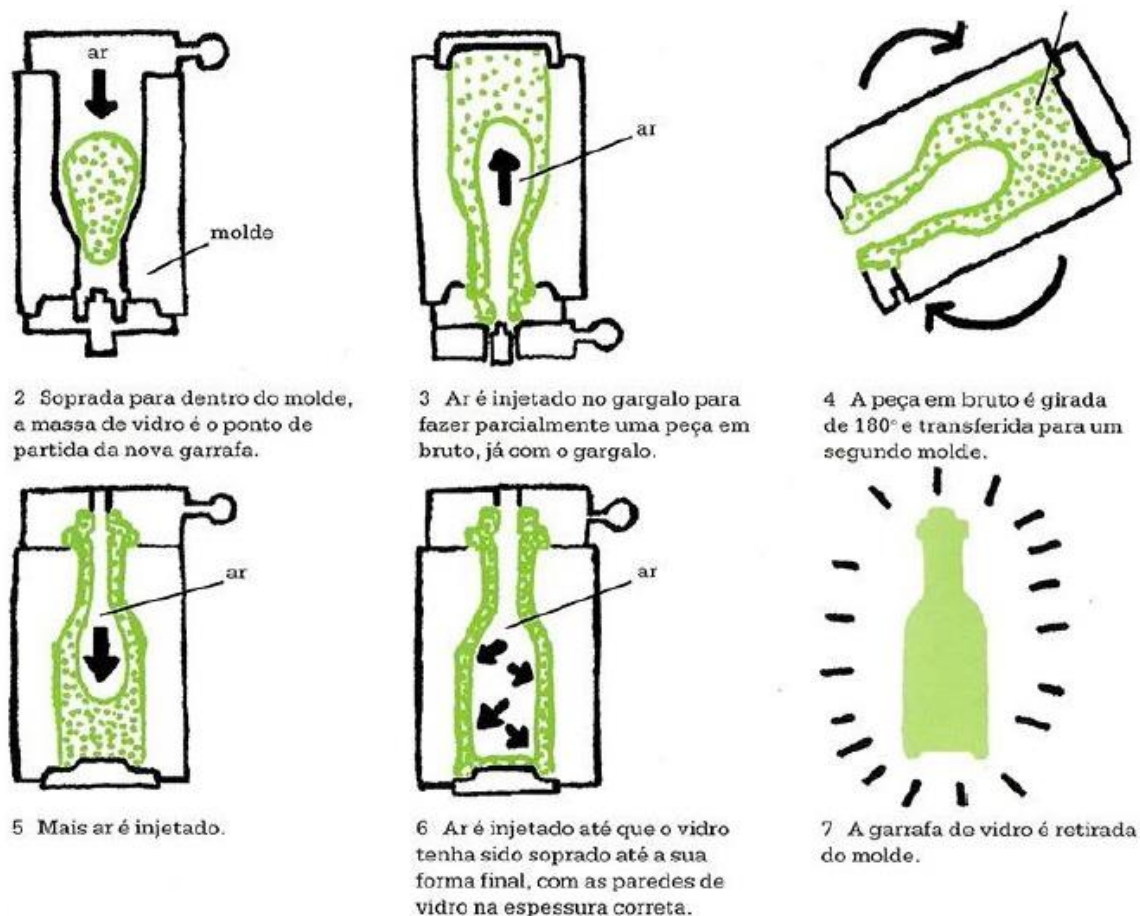
Diante do destino incorreto e da grande demanda de garrafas, principalmente do tipo *long-neck*, Righi *et al.* (2012) apresentam uma alternativa de reutilização sustentável do vidro. Os autores propõem a incorporação do vidro em misturas cimentícias, realizando a moagem desse resíduo de vidro, tendo-o como substituto da areia.

Já Simões (2013) destaca a substituição do resíduo de vidro em pó de forma parcial do cimento. O autor entende que a reutilização do vidro com propriedades pozolânicas em elementos fabricados a partir do cimento não só dará uma correta destinação ao resíduo que hoje é de forma incorreta, como também diminuirá a extração de matérias primas necessárias na composição do Cimento *Portland*.

2.3 Vidro para produção de garrafas

A produção de garrafas de vidro inicia com a fusão das matérias-primas a 1550°C, gerando uma massa de vidro, que é despejada em um molde (FIGURA 8) para ser conformado com injeção de ar no vidro, dando formato parcial ao gargalo e à garrafa. O vidro é então removido e adicionado a outro molde, rotacionando sua posição em 180° e novamente injetado ar para dar forma final a garrafa, para posteriormente ser levada a um forno onde será feito o alívio das tensões (DALLAQUA, 2016).

Figura 8 - Moldagem de garrafas de vidro



Fonte: Dallaqua (2016, p. 21).

2.4 Utilização do vidro moído no concreto

A substituição de agregado miúdo no concreto pelo vidro moído, é uma realidade que já é praticada em diversos locais do mundo. Países como a Austrália, realizam o processo onde o vidro é proveniente dos aterros sanitários, reciclado, moído e adicionado à mistura para a produção de concreto em construções civis (CRENTSIL *et al.*, 2001).

No Brasil, o que dificulta essa prática, segundo Nascimento *et al.* (2014), é além da maior facilidade de destinação do resíduo em aterros sanitários, o alto custo para obtenção dos resíduos de vidro. Seu processo de triagem e separação é complexo pois os resíduos devem ser separados por cores e tipos de material, por apresentarem diferentes composições e propriedades.

De acordo com Simões *et al.* (2013) estudos já vêm sendo feitos por vários pesquisadores e resultam em um potencial pozolânico do vidro. Isso acontece quando o vidro é moído a uma granulometria abaixo de 75 μm , e este fator se dá pela considerável quantidade de sílica amorfa que está presente em sua composição, dando ao vidro moído o efeito pozolânico.

Simões (2013) aponta que estudos já realizados mostram que a melhor forma de se utilizar o resíduo de vidro em compostos de cimento é na forma de pó. O autor também destaca que a utilização seja em substituição parcial de cimento, visto que quanto mais fino, o resíduo de vidro tende a ter melhor atividade pozolânica.

Fávero (2009) aponta em seu estudo, que substituindo o agregado miúdo em sua totalidade por vidro moído com módulo de finura (MF=3), o teste de compressão resultou em uma resistência 10% maior quando comparada com o traço de referência. Quando adicionado na proporção de 10%, em substituição do cimento, o vidro moído com granulometria passante na peneira de nº 200, resultou em um aumento de 20% na resistência à compressão em relação ao traço de referência.

O resíduo de vidro moído com uma granulometria maior que 300 μm , não é considerado satisfatório para ser utilizado em substituição de agregado miúdo no concreto. Isso se deve à perda de resistência em decorrência da reação álcalis do cimento quando reage com a sílica do vidro, e que ainda ocasiona a expansão do material (RIGHI *et al.*, 2012).

Simões *et al.* (2013) fez a caracterização do resíduo do vidro, ensaiando o mesmo em vários testes. O autor fez ensaios como a técnica de fluorescência de raios-X, perda ao fogo, análise física, análise mineralógica e de pozolanicidade. Os resultados obtidos por ele se encontram na Tabela 2.

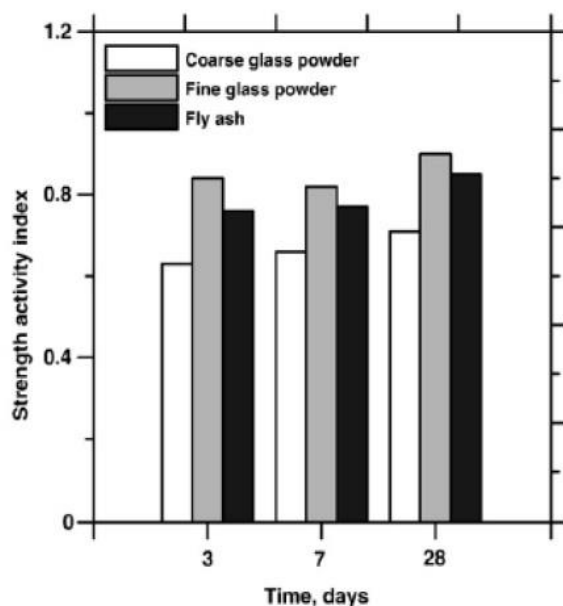
Tabela 2 - Comparativo de propriedades do RVL com NBR 12653

Propriedades	Limites - NBR 12653 para diferentes classes de material pozolânico			
	N	C	E	RVL
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ % min	70	70	50	63,13
SO ₃ % máximo	4	5	5	0,16
Teor de umidade % máxima	3	3	3	3,67
Perda ao fogo % máxima	10	6	6	11,81
álcalis disponíveis em Na ₂ O % máx.	1,5	1,5	1,5	15,41
% máxima retida na peneira 45 µm	34	34	34	4,5
Índice de atividade pozolânica:				
* Com a cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6	4,77
* Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle % min.	75	75	75	86,36
* Água requerida % máx.	115	110	110	100,04

Fonte: Simões *et al.* (2013, p. 47).

Schwarz e Neithalath *apud* Simões (2013, p. 51) compararam através de ensaios, as propriedades de cinzas volantes, do vidro moído grosso e do vidro moído fino, onde obtiveram os resultados de atividade pozolânica que são mostrados no Gráfico 1, com períodos de 3, 7 e 28 dias. Os resultados atingidos mostraram que o vidro, quando moído com granulometria fina, obteve maior atividade pozolânica do que as cinzas volantes, em todas as idades estudadas.

Gráfico 1 - Atividade pozolânica de cinzas volantes e vidro



Fonte: Schwarz e Neithalath *apud* Simões (2013, p. 51).

Simões (2013) ainda apresenta a Tabela 3 com resultados de diferentes autores quanto ao índice de atividade pozolânica do vidro em porcentagem, de acordo com a sua granulometria. A tabela mostra que quanto menor for a partícula, mais pozolânico será o resíduo de vidro moído.

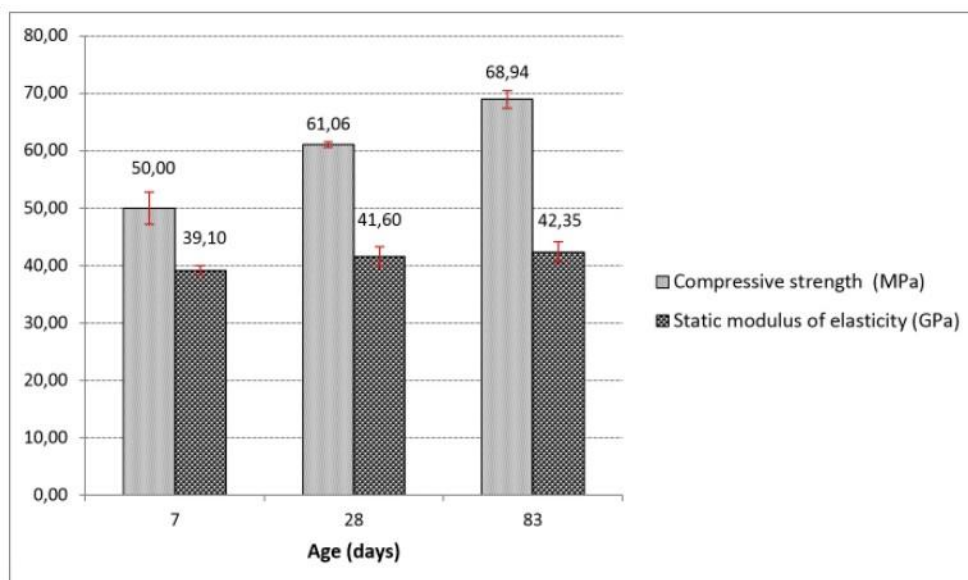
Tabela 3 - Índice pozolânico

Tamanho das partículas	Índice de atividade pozolânica	Pesquisadores
Tamanho médio de 5 μm	104%	Paiva <i>et al.</i> (2010)
$\leq 40 \mu\text{m}$	85%	Khmiri <i>et al.</i> (2012)
$\leq 75 \mu\text{m}$	90%	Matos e Souza-Coutinho (2012)
$\leq 75 \mu\text{m}$	85%	Pereira-de-Oliveira <i>et al.</i> (2012)
$\leq 60 \mu\text{m}$	92% e 110%	Shi <i>et al.</i> (2005)
$\leq 100 \mu\text{m}$	90%	Idir e Cyre Tagnit-Hamou (2011)
$\leq 100 \mu\text{m}$	80%	Ismail e Al-Hashmi (2009)
$\leq 100 \mu\text{m}$	85%	Araújo <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Simões (2013, p. 52).

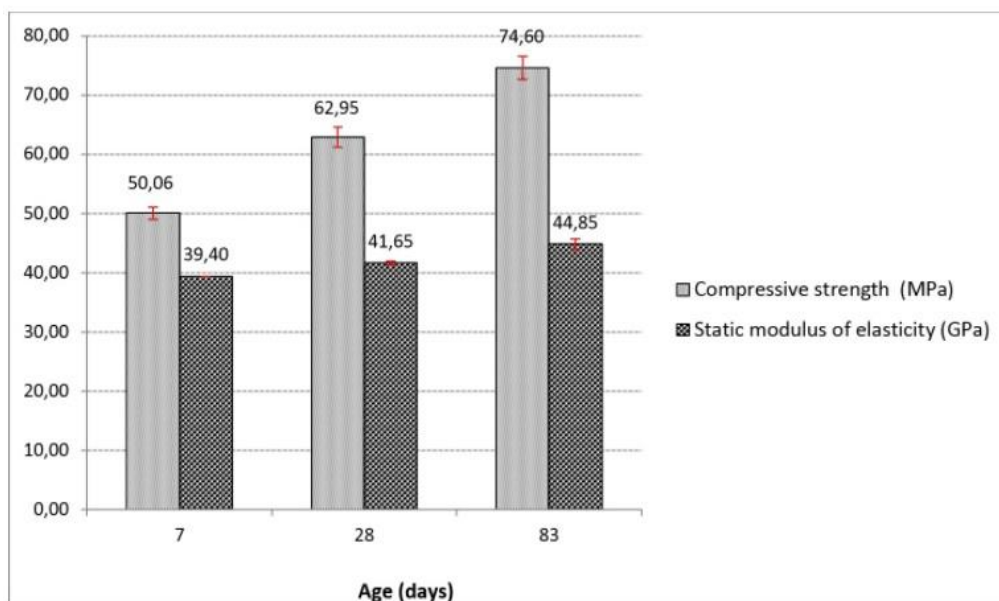
A atividade pozolânica do vidro, quando substituto do cimento em proporção de 50%, é confirmada por Matos *et al.* (2016) que em seu estudo obteve resultados consideráveis de resistência à compressão entre 28 e 83 dias. O resultado ainda mostrou uma maior resistência à penetração de íons-cloretos. O resultado do teste à compressão do traço de referência é visto no Gráfico 2, e o resultado com substituição de 50% de vidro moído é visto no Gráfico 3.

Gráfico 2 - Teste compressão traço de referência



Fonte: Matos *et al.* (2016, p. 71).

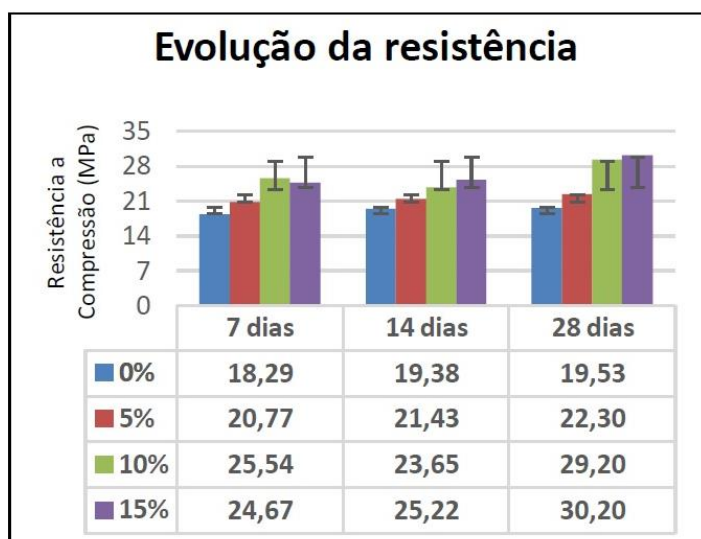
Gráfico 3 - Teste compressão com 50% de vidro moído.



Fonte: Matos *et al.* (2016, p. 71).

Cordeiro e Montel (2015) apresentam no Gráfico 4 a evolução da resistência à compressão quando um concreto é fabricado com substituição parcial de agregado miúdo por 0%, 5%, 10% e 15% de vidro moído. Os resultados mostram uma resistência superior nos corpos de prova com incorporação de 5%, 10% e 15%, em comparação ao traço de referência.

Gráfico 4 - Evolução de resistência do concreto



Fonte: Cordeiro e Montel (2015, p. 118).

Muitos autores, como Fávero (2009), Simões (2013), Nascimento *et al.* (2014), Cordeiro e Montel (2015) e, Matos *et al.* (2016), mostram em seus trabalhos a

utilização de diferentes tipos de vidro oriundos de diversos locais. Vidros de para-brisas, sucata de vidraçarias, e resíduos de vidro doméstico são alguns dos tipos de vidros já incorporados ao concreto.

Visando a questão ambiental e sustentável, Righi *et al.* (2012) utilizaram em seu teste as garrafas do tipo *long-neck*, tendo em vista a abundância existente deste resíduo, bem como a forma incorreta em que o mesmo é descartado. Os autores realizaram ensaios com substituições de 5, 10, 15, 20 e 100% do agregado miúdo do seu traço de referência pelo vidro moído das garrafas. Na Tabela 4 são apresentados os traços utilizados pelos autores para obtenção dos corpos de prova.

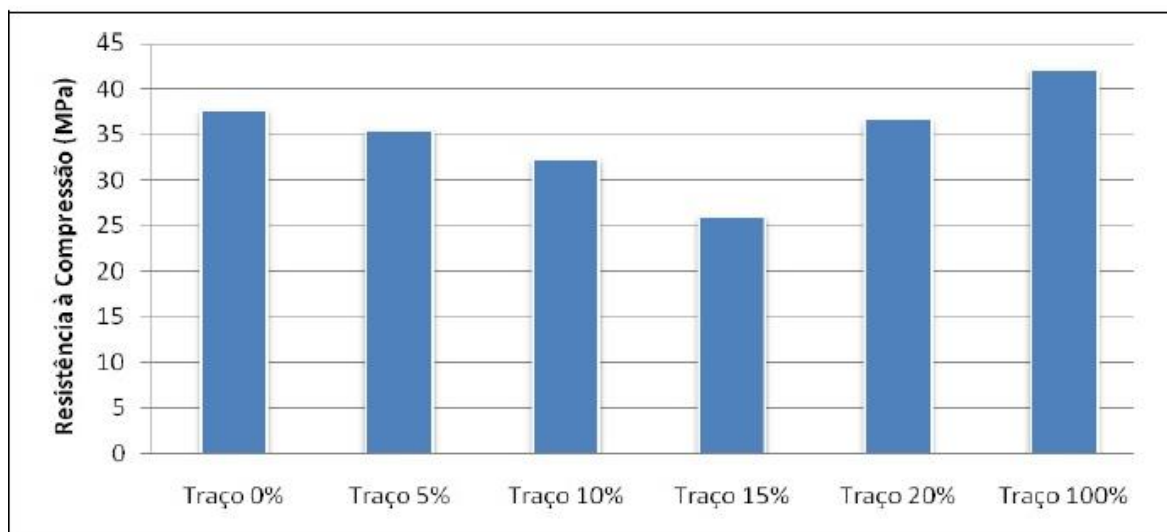
Tabela 4 - Traços de substituição de areia por vidro moído

TRAÇO	VIDRO (%)	CIMENTO (kg)	AREIA (kg)	VIDRO (kg)	BRITA (kg)	ÁGUA (L)
0% Vidro	0	10,52	20,40	0,00	32,18	4,73
5% Vidro	5	10,52	19,38	1,02	32,18	4,73
10% Vidro	10	10,52	18,36	2,04	32,18	4,73
15% Vidro	15	10,52	17,34	3,06	32,18	4,73
20% Vidro	20	10,52	16,32	4,08	32,18	4,73
100% Vidro	100	10,52	0,00	20,70	32,18	4,73

Fonte: Righi *et al.* (2012, p. 6).

Os resultados de teste de compressão apresentados por Righi *et al.* (2012), mostram (GRÁFICO 5) o que os autores já esperavam, de acordo com o seu conhecimento referencial. Dos traços ensaiados pelos autores, os com substituições de até 15% de areia pelo vidro moído das garrafas, resultaram em resistência à compressão inferior ao traço de referência, contudo, a substituição de 100% de areia pelo vidro moído das garrafas, resultou em uma resistência à compressão maior do que a do traço tido como referência.

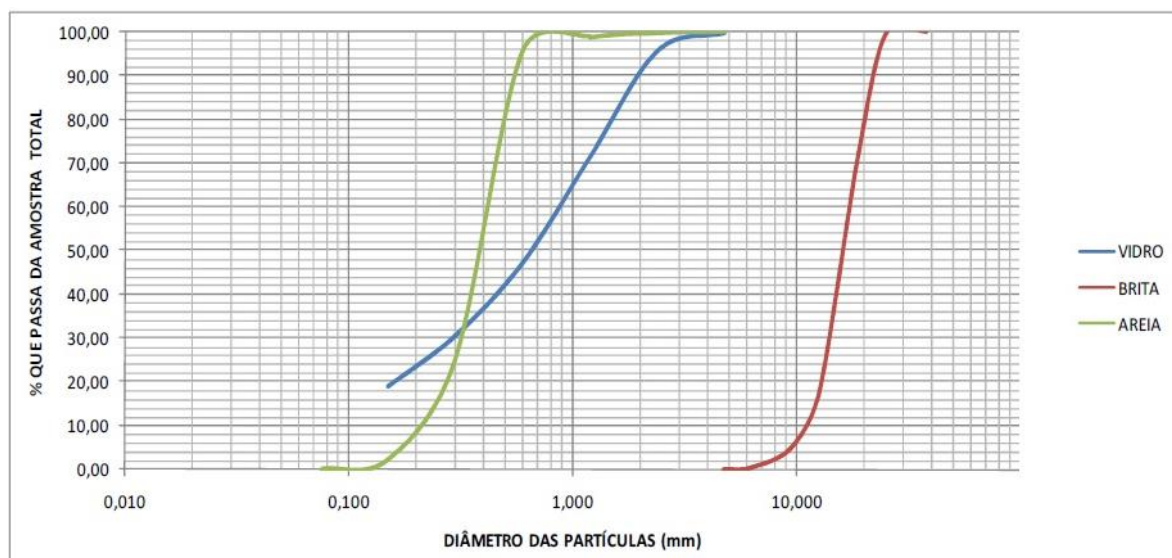
Gráfico 5 - Resultados teste de compressão



Fonte: Righi *et al.* (2012, p. 8).

Righi *et al.* (2012) entendem que o aumento da resistência à compressão, quando o agregado miúdo é substituído em 100% pelo vidro moído das garrafas, é efeito do aumento do teor de finos. Essa análise foi feita tendo em consideração a curva granulométrica tanto do vidro moído, quanto da areia (GRÁFICO 6).

Gráfico 6 - Curva granulométrica areia, vidro moído e brita



Fonte: Righi *et al.* (2012, p. 6).

Tendo como possível a substituição de agregados, bem como do cimento, por pó de vidro moído, é necessária atenção quanto à reação álcali-sílica, que também pode ser denominada de álcali-agregado. A reação álcali-agregado é, segundo Neville

e Brooks (2010), a propriedade que o composto de um agregado tem em reagir com a pasta de cimento.

Tiecher (2006) diz que a reação álcali-agregado é uma reação química que acontece no contato dos hidróxidos alcalinos, que são encontrados no cimento, água de amassamento, pozolanas e etc., com tipos de minerais que são encontrados nos agregados usualmente utilizados em produtos cimentícios. A reação álcali-agregado acontece, segundo Ribeiro (2015), na combinação dos álcalis do cimento com algum agregado que pode ser reativo ou potencialmente reativo, tendo ainda nessa combinação a presença constante da umidade.

Righi *et al.* (2012) destacam que pelo fato do vidro possuir sílica na sua composição química, este material pode reagir com os álcalis do cimento. A reação acontece com presença de umidade, formando um gel expansivo, este sendo nocivo ao concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a reação álcali-agregado, tomando como base o vidro moído, que apresenta a sílica em estado amorfo, para reagir com a pasta de cimento, depende da granulometria das partículas, da temperatura e ainda do tempo. Ainda segundo os autores, a reação álcali-agregado pode causar deterioração no concreto, devido à formação de um gel sílico-alcalino, que absorve a água por osmose, gerando assim uma expansão.

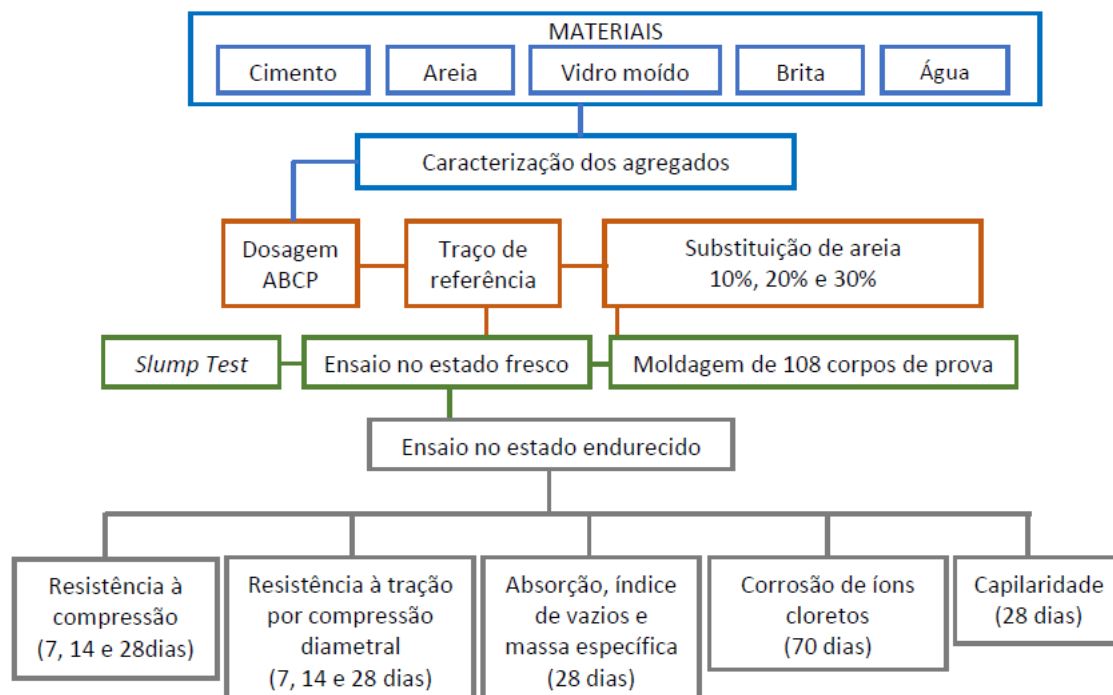
Simões (2013) enfatiza que o que pode determinar a grandeza desta reação é a granulometria das partículas. Fávero (2009) destaca que a adição de pozolanas em um concreto que possui como substituto de agregado, o vidro moído, pode reduzir ou até inibir a reação álcali-agregado, e de forma que o vidro moído seja acrescentado em forma de pó, o que lhe garante propriedades pozolânicas, de acordo com a porcentagem em que for adicionado, esta mesma reação é reduzida ou inibida.

Ribeiro (2015) aponta que o controle dessa reação consiste em alguns fatores. Para o autor deve ser feita a escolha de um cimento com teor reduzido de álcalis, bem como o uso de agregados sem potencial reativo, contudo, também interfere a presença da umidade e a temperatura.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho, de acordo com os objetivos propostos, foi desenvolvido um programa experimental que engloba os materiais, dosagens, ensaios e equipamentos utilizados para os mesmos, em conformidade com as normatizações brasileiras. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção da Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES. O programa experimental e suas etapas está ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Programa Experimental



Fonte: Do autor (2018).

3.1 Materiais

Os concretos foram fabricados com a mistura de cimento, areia, brita, água e vidro moído. Os materiais utilizados para a confecção dos concretos são provenientes do LATEC, com exceção ao vidro que foi coletado em uma casa de eventos na cidade de Encantado/RS.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento *Portland* (CP) do tipo CP V - ARI RS, da marca Cimpor, cujas características são, de acordo com o fabricante, alta resistência inicial e alta resistência a sulfatos. De acordo com o fabricante, este cimento atende aos requisitos das normas NBR 5733 (ABNT, 1991) – Cimento *Portland* de alta resistência inicial, e NBR 5737 (ABNT, 1992) - Cimento *Portland* resistente a sulfatos. O fabricante ainda orienta que o CP V – ARI RS é recomendado para usos em estruturas que necessitam de altas resistências iniciais e rápidas desformas, podendo alcançar resistência de 21 MPa em 24 Horas. Este cimento conta com a adição de até 5% de fíler calcário, o máximo permitido pela norma. A Tabela 5 apresenta a composição do material.

Tabela 5 - Composição cimento

Composição	
Tipo	V
Sigla	CP V - ARI
Norma	NBR 5733
Clínquer + Gesso	95 a 100%
Fíler calcário	0 a 5%

Fonte: ABCP (2002).

3.1.2 Areia

Foi utilizada uma areia classificada de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) em função da sua granulometria como areia média, do tipo quartzosa, que é proveniente da região do Vale do Taquari, e obtida no LATEC. tendo em sua granulometria grãos de 0,42 mm a 1,2 mm. Para determinação de características desta areia, foram realizados ensaios de massa unitária, massa específica e determinação granulométrica.

3.1.2.1 Determinação da massa unitária e massa específica da areia

O ensaio de massa unitária foi realizado de acordo com o especificado na NBR NM 45 (ABNT, 2006), pelo método C. Para o ensaio se obteve uma amostra de areia e foram utilizados um recipiente cilíndrico, com capacidade de volume de acordo com o estabelecido na norma, uma haste de adensamento e balança com resolução de 50g.

O ensaio consistiu na secagem da amostra de areia em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até obtenção de massa constante. Posteriormente foi registrada a massa do recipiente cilíndrico vazio, e então despejado o agregado em seu interior, a uma altura máxima de 50 mm da borda do recipiente (FIGURA 10). Após o recipiente estar completamente cheio de agregado foi feito o nivelamento da camada superficial do agregado e então feito a medição da massa do conjunto recipiente + agregado. Após a realização do ensaio, a obtenção do valor da massa unitária do agregado foi feita através da Equação 1.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m³);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (Kg);

m_r = massa do recipiente vazio (Kg);

V = Volume do recipiente (m^3).

Figura 10 - Despejo da areia no recipiente cilíndrico



Fonte: Do autor (2018).

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), que define agregado miúdo como aquele que passa pela peneira de malha 9,5 mm, que passa quase que totalmente pela peneira 4,75 mm e que sua maior parte fica retida na peneira de 75 μm . A norma também define como massa específica a relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Para a realização do ensaio foi obtido uma amostra de 1 kg de areia. Foram utilizados balança, frasco aferido, molde tronco-cônico, haste de compactação, estufa, bandeja metálica e espátula.

Para o desenvolvimento do ensaio, primeiramente a amostra foi colocada em um recipiente onde foi coberta por água e deixada em repouso pelo período de 24 horas. Posteriormente a amostra foi colocada para secar em local com corrente de ar, até que obtivesse uma secagem uniforme e que os grãos não ficassem fortemente aderidos uns aos outros.

Após a secagem o agregado foi colocado no molde tronco-cônico sem comprimi-lo, e então foram aplicados 25 golpes leves na superfície para posterior retirada vertical do molde (FIGURA 11). Esse procedimento deve ser repetido caso o molde for retirado e o formato de cone for mantido, o que indica que o agregado ainda apresenta superfície úmida, portanto o agregado deve ser seco por mais um período e o procedimento repetido até que o formato de cone desmorone ao se retirar o molde, que indicará que o agregado terá chegado a condição de saturado com superfície seca (FIGURA 12).

Figura 11 - Verificação da condição de saturação de superfície seca da areia.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 12 - Areia em estado saturado com superfície seca



Fonte: Do autor (2018).

Com o agregado na condição de saturado com superfície seca foi realizada a medição de massa (500 ± 1) g da amostra (m_s), colocada no frasco aferido, medido a massa do conjunto frasco + amostra (m_1) e preenchido o frasco com água até a

marca de 500 ml (FIGURA 13), movimentando-o de forma a eliminar as bolhas de ar que ficaram contidas e posterior banho em temperatura constante de $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Figura 13 - Conjunto frasco aferido + amostra



Fonte: Do autor (2018).

Após uma hora de banho, o frasco foi completado com água até a marca da 500 cm³ e então medido a massa do conjunto (m_2). Posteriormente a amostra foi levada para secar em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até obter massa constante, esfriada e medida a massa da amostra seca (m) (FIGURA 14). Completada todas as etapas do ensaio, a massa específica foi obtida através da Equação 2.

Figura 14 - Amostra de areia após secagem em estufa



Fonte: Do autor (2018).

$$\gamma = \frac{m}{\left(V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}\right) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (2)$$

Onde:

γ = Massa específica do agregado (g/cm³);

m = massa da amostra seca (g);

m_1 = massa do conjunto frasco + amostra (g);

m_2 = massa do conjunto frasco + amostra + água (g);

m_s = massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

V = volume do frasco (cm³);

ρ_a = massa específica da água (g/cm³).

Os valores de massa unitária e massa específica da areia encontrados através deste ensaio foram respectivamente 1,66 g/cm³ e 2,45 g/m³.

3.1.2.2 Determinação da granulometria da areia

A granulometria da areia foi determinada através do ensaio com peneiras de abertura da série normal, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a realização do ensaio usou-se 2 amostras de areia seca em estufa a (105 ± 5) °C, bandejas, balança, escova, agitador mecânico, fundo avulso de peneiras e peneiras com abertura de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 µm, 300 µm e 150 µm.

Para a execução do ensaio foram coletadas duas amostras, colocadas em bandejas e secadas em estufas, após esfriadas em temperatura ambiente sendo medidas as suas massas (m_1 e m_2). As peneiras foram previamente limpas e encaixadas em ordem crescente da base para o topo, juntamente com o fundo de peneiras.

Cada amostra foi colocada no conjunto de peneiras e levada para o agitador mecânico (FIGURA 15) pelo tempo de 5 minutos. Após essa etapa, para cada peneira foi medida a massa de material que ficou retido.

Figura 15 - Agitador mecânico de peneiras



Fonte: Do autor (2018).

As distribuições granulométricas obtidas para as duas amostras de areia ensaiadas resultaram na Tabela 6. A partir da Tabela 6 e da Tabela 7 obtida na NBR 7211 (ABNT, 2009), que determina os limites de material retido em cada malha, foi elaborado o Gráfico 7 com as zonas utilizáveis estipuladas pela norma, onde constatou-se que a areia utilizada ficou dentro dos limites aceitáveis.

Tabela 6 - Distribuição granulométrica da areia

Malha	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Retida Variações (%)	Retida média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	18,9	23,4	3,7%	4,6%	0,9%	4,1%	4,1%
2,36	41,2	40,7	8,0%	7,9%	0,0%	8,0%	12,1%
1,18	61,2	56,9	11,8%	11,1%	0,7%	11,5%	23,5%
0,6	68,9	63,9	13,3%	12,5%	0,8%	12,9%	36,4%
0,3	141,4	139,2	27,3%	27,2%	0,1%	27,2%	63,7%
0,15	169,7	170,8	32,8%	33,3%	0,6%	33,1%	96,7%
Fundo	16,4	17,4	3,2%	3,4%	0,2%	3,3%	100,0%
Total	517,7	512,3	Módulo de Finura=		2,36	DMC	4,75

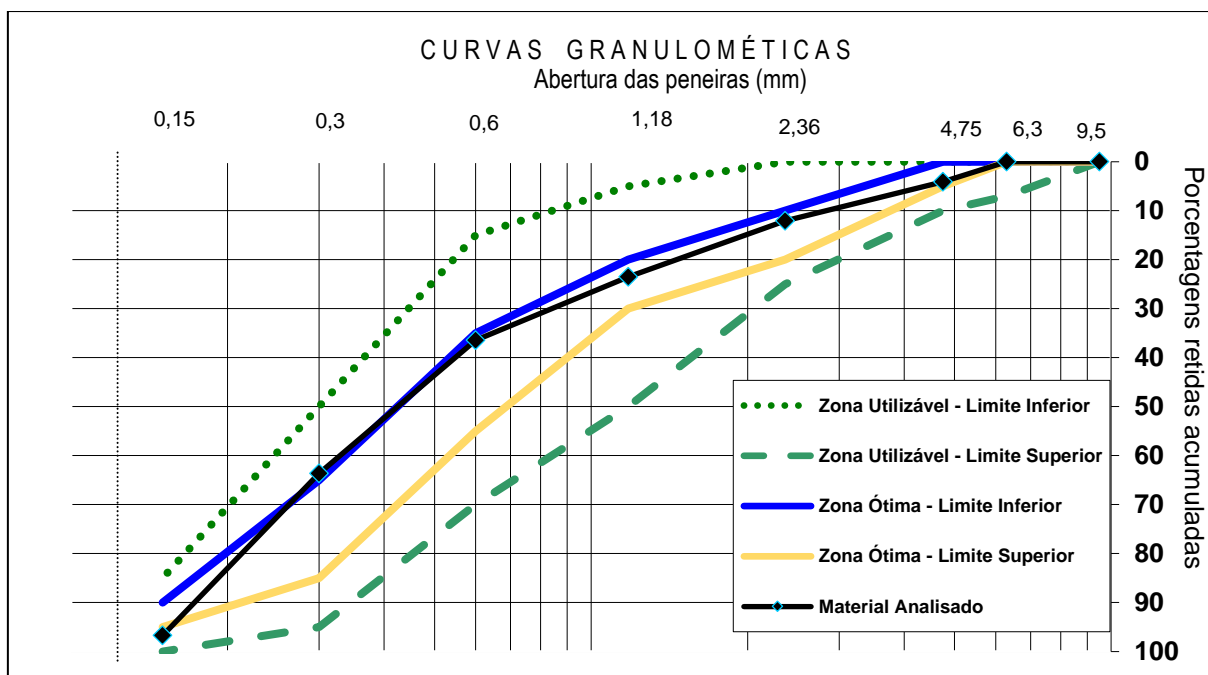
Fonte: Do autor (2018).

Tabela 7 - Zona utilizável da areia

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
0,6 mm	15	35	55	70
0,3 mm	50	65	85	95
0,15 mm	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211 (2009, p. 5).

Gráfico 7 - Curva granulométrica da areia



Fonte: Do autor (2018).

3.1.3 Brita

Neste estudo foi utilizada para fabricação dos concretos a brita 1 de origem basáltica, oriunda do LATEC, que tem sua granulometria entre 9,5 a 19 mm de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). Para a brita utilizada foram realizados os ensaios de massa específica, massa unitária e determinação granulométrica.

3.1.3.1 Determinação da massa unitária e massa específica da brita

O ensaio para determinação da massa unitária da brita foi realizado de acordo com o método C descrito na NBR NM 45 (ABNT, 2006). Para o ensaio foi coletada uma amostra da brita e os equipamentos utilizados foram um recipiente cilíndrico, haste para adensamento e balança com resolução de 50g.

O ensaio consistiu na secagem da amostra de brita em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até obtenção de massa constante. Posteriormente foi registrado a massa do recipiente cilíndrico vazio, e então despejado o agregado em seu interior, a uma altura máxima de 50 mm da borda do recipiente (FIGURA 16).

Figura 16 - Despejo da brita no recipiente cilíndrico



Fonte: Do autor (2018).

Após o recipiente estar completamente cheio de brita foi feito o nivelamento da camada superficial do agregado e então realizada a medição da massa do conjunto recipiente + agregado. Após a realização do ensaio, para obtenção do valor da massa unitária do agregado foi utilizada a Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m^3);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (Kg);

m_r = massa do recipiente vazio (Kg);

V = Volume do recipiente (m^3).

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009), que define agregado gráúdo como aquele que tem sua maior porcentagem retida na peneira de 4,75 mm. A norma também define como massa específica a relação entre a massa do agregado seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis.

Para a realização do ensaio foi obtido uma amostra de 3 Kg de brita (FIGURA 17). Foram utilizados balança, cesto de arame, tanque de água e bandejas.

Figura 17 - Amostra de brita.



Fonte: Do autor (2018).

Para o desenvolvimento do ensaio, primeiramente a amostra foi colocada em um recipiente onde foi coberta por água e deixada em repouso pelo período de 24 horas. Posteriormente a amostra foi retirada da água e enxugada em pano absorvente até que a água visível fosse eliminada (FIGURA 18).

Figura 18 - Secagem da amostra de brita



Fonte: Do autor (2018).

Ligeiramente após enxugar a amostra, foi medida sua massa na condição de saturado superfície seca (m_s) (FIGURA 19) e então colocada em recipiente de cesto de arame com abertura de malha igual ou inferior a 3,35 mm e capacidade volumétrica entre 4 a 7 dm³, submergida em água em temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ para registro da massa da amostra em água (m_a) (FIGURA 20).

Figura 19 - Massa do agregado saturado superfície seca



Fonte: Do autor (2018).

Figura 20 - Massa do agregado em água



Fonte: Do autor (2018).

Após estas etapas a amostra foi seca em estufa até obter massa constante e posteriormente foi esfriada até possível manipulação do agregado e medição da massa do agregado seco (m). Após ter completado todas as etapas do ensaio, a massa específica foi obtida através da Equação 4.

$$\gamma = \frac{m}{m - m_a} \quad (4)$$

Onde:

γ = Massa específica do agregado (g/cm^3);

m = massa da amostra seca (g);

m_a = massa do conjunto frasco + amostra (g).

Os valores de massa unitária e massa específica através do ensaio realizado para a brita foram respectivamente de $1,49 \text{ g/cm}^3$ e $2,75 \text{ g/cm}^3$.

3.1.3.2 Determinação da granulometria da brita

A granulometria da brita foi determinada através do ensaio com peneiras de abertura da série normal e intermediária, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a realização do ensaio usou-se 2 amostras de aproximadamente 1000 g de brita seca em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, bandejas, balança, escova, agitador mecânico, fundo avulso de peneiras e peneiras com abertura de malhas de 19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm.

Para a execução do ensaio foram coletadas duas amostras, colocadas em bandejas e secadas em estufas, após esfriadas em temperatura ambiente e medido suas massas (m_1 e m_2). As peneiras foram previamente limpas e encaixadas em ordem crescente da base para o topo, juntamente com o fundo de peneiras.

Cada amostra foi colocada no conjunto de peneiras e levadas para o agitador mecânico (FIGURA 21) pelo tempo de 5 minutos. Após essa etapa, para cada peneira foi medida a massa de material que ficou retido.

Figura 21 - Agitador mecânico de peneiras



Fonte: Do autor (2018).

Através do ensaio obteve-se as granulometrias das duas amostras de brita que resultaram na Tabela 8. A partir da Tabela 8 e da Tabela 9, obtida na NBR 7211 (ABNT, 2009), que determina os limites utilizáveis de material retido em cada malha,

foi elaborado o Gráfico 8 com as zonas utilizáveis estipuladas pela norma para a brita 1, onde constatou-se que a brita utilizada apresentou zonas que ficaram fora dos limites prescritos pela norma, deste modo os valores do ensaio de granulometria foram analisados para as zonas utilizáveis para a brita 2, onde se constatou que o material apresentou maiores zonas fora do limite aceitável pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 8 - Distribuição granulométrica da brita

Malha	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Retida Variações (%)	Retida média (%)	Retida acumulada (%)
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b			(%)
25	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
19	112,3	85,0	10,5%	8,5%	2,0%	9,5%	9,5%
12,5	872,2	802,8	81,6%	80,3%	1,3%	80,9%	90,4%
9,5	83,3	111,1	7,8%	11,1%	3,3%	9,4%	99,9%
6,32	1,4	1,4	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	100,0%
4,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Fundo	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
Total	1.069,2	1.000,3	Módulo de finura =		3,00	DMC=	25

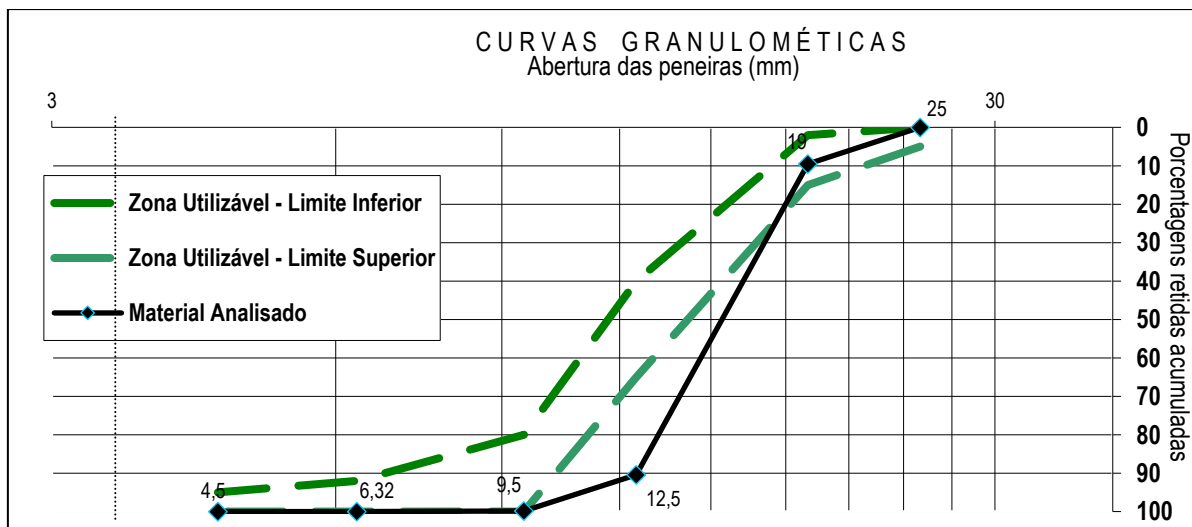
Fonte: Do autor (2018).

Tabela 9 - Zona utilizável da brita

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica (mm)				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
	Brita 0	Brita 1	Brita 2	Brita 3	Brita 4
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	5 – 25	87 – 100	-
19 mm	-	2 - 15	65 - 95	95 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40- 65	92 – 100	-	-
9,5 mm	2 – 15	80 - 100	-	-	-
6,3 mm	40 - 65	92 - 100	-	-	-
4,75 mm	80 - 100	95 -100	-	-	-

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 7211 (2009, p. 8).

Gráfico 8 - Curva granulométrica com zonas utilizáveis da brita 1



Fonte: Do autor (2018).

Visto que as amostras ensaiadas apresentaram valores que não correspondem com o especificado pela normatização, o ensaio foi novamente realizado com novas amostras, porém os resultados se apresentaram parecidos com os apresentados acima. Como os resultados apresentam um material fora das diretrizes especificadas na NBR 7211 (ABNT, 2009), verifica-se um possível erro de granulometria do material disponibilizado pelo LATEC no período em que este estudo foi realizado.

3.1.4 Água de amassamento

A água de amassamento que foi utilizada juntamente com os agregados e aglomerantes no concreto, foi a água disponível no LATEC. Esta água é potável e provém da rede de abastecimento público da CORSAN (Companhia Riograndense de Saneamento) e atendo aos requisitos mínimos exigidos pela NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

3.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o Tec Flow 8000 da marca Rheotec Aditivos de Concreto. O aditivo se apresenta em forma de líquido avermelhado e deve

ser utilizado nas proporções de 0,3 a 2% do cimento. De acordo com o fabricante, este aditivo permite dar mais trabalhabilidade para o concreto, e permite reduzir a relação água/cimento, o que resulta em concretos de alta qualidade.

3.1.6 Vidro Moído

O vidro utilizado para os ensaios desta pesquisa é oriundo da coleta seletiva de garrafas de cerveja do tipo *long-neck* (FIGURA 22). O propósito de adotar este material é devido a sua elevada quantidade no meio ambiente em consequência de não possuir uma destinação final adequada na região. Todas as garrafas utilizadas foram selecionadas de uma mesma marca e de cor marrom.

Inicialmente, as garrafas passaram por um processo de limpeza, através da retirada de rótulos com imersão em água com detergente neutro para a remoção de resíduos. Posteriormente as garrafas já higienizadas (FIGURA 23) foram previamente quebradas (FIGURA 24) para futura moagem através de um moinho mecânico de bolas do LATEC, até chegar na granulometria da areia utilizada.

Figura 22 - Garrafas do tipo *long-neck*.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 23 - Garrafa *long-neck* higienizada



Fonte: Do autor (2018).

Figura 24 - Garrafa previamente quebrada



Fonte: Do autor (2018).

3.1.6.1 Moagem do vidro

Para moagem do vidro, utilizou-se o moinho mecânico de bolas (FIGURA 25), com 66 esferas de aço com massa de 112 g cada. Para obtenção da granulometria desejada, a mais próxima possível da granulometria da areia, pegou-se amostras de 1 kg do vidro previamente quebrado e colocou-se no moinho de bolas por diferentes intervalos de tempo, até que se chegasse na curva granulométrica usada neste trabalho. O tempo ideal para obtenção da granulometria foi de 10 minutos e resultou no material da FIGURA 26. Para o vidro moído foram realizados ensaios de granulometria e massa específica.

Figura 25 - Moinho mecânico de bolas



Fonte: Do autor (2018).

Figura 26 - Vidro moído



Fonte: Do autor (2018).

3.1.6.2 Determinação da granulometria do vidro moído

A granulometria do vidro moído foi determinada através do ensaio com peneiras de abertura da série normal, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a realização do ensaio usou-se 2 amostras de vidro moído seco em estufa a (105 ± 5) °C, bandejas, balança, escova, agitador mecânico, fundo avulso de peneiras e peneiras com abertura de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 600 μm , 300 μm e 150 μm .

Para a execução do ensaio foram coletadas duas amostras, colocadas em bandejas e secadas em estufas, após esfriadas em temperatura ambiente e medido

suas massas (m_1 e m_2). As peneiras foram previamente limpas e encaixadas em ordem crescente da base para o topo, juntamente com o fundo de peneiras.

Cada amostra foi colocada no conjunto de peneiras e levadas para o agitador mecânico (FIGURA 27) pelo tempo de 5 minutos. Após essa etapa, para cada peneira foi medida a massa de material que ficou retido.

Figura 27 - Agitador mecânico de peneiras



Fonte: Do autor (2018).

Após obtenção da curva granulométrica do vidro moído e das porcentagens necessárias para cada granulometria, todo o vidro recolhido foi moído e separado de acordo com as peneiras utilizadas para obtenção da curva (FIGURA 28). Esse procedimento foi realizado para garantir a homogeneidade do material.

Figura 28 - Vidro moído separado por granulometrias



Fonte: Do autor (2018).

3.1.6.3 Determinação da massa unitária e massa específica do vidro moído

O ensaio de massa unitária do vidro moído foi realizado de acordo com o especificado na NBR NM 45 (ABNT, 2006), pelo método C. Para o ensaio se obteve uma amostra de vidro moído e foram utilizados um recipiente cilíndrico, com capacidade de volume de acordo com o estabelecido na norma, uma haste de adensamento e balança com resolução de 50g.

O ensaio consistiu na secagem da amostra em estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até obtenção de massa constante. Posteriormente foi registrado a massa do recipiente cilíndrico vazio, e então despejado o agregado em seu interior, a uma altura máxima de 50 mm da borda do recipiente. Após o recipiente estar completamente cheio de agregado foi feito o nivelamento da camada superficial do material e então feito a medição da massa do conjunto recipiente + vidro moído. Após a realização do ensaio, a obtenção do valor da massa unitária foi feita através da Equação 5.

$$\rho_{ap} = \frac{(m_{ar} - m_r)}{V} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa unitária do agregado (Kg/m³);

m_{ar} = massa do conjunto recipiente + agregado (Kg);

m_r = massa do recipiente vazio (Kg);

V = Volume do recipiente (m³).

O ensaio de massa específica foi realizado de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017). A obtenção do resultado é feita pela relação entre a massa de vidro moído utilizada para o ensaio e o volume de líquido deslocado no interior do frasco de *Le Chatelier*. Para a realização deste ensaio foi utilizado uma amostra seca do vidro moído, frasco de *Le Chatelier*, funis, balança, querosene (por ser um líquido não reagente com o material) e recipiente para conter a amostra (FIGURA 29).

Figura 29 - Materiais utilizados para ensaio de massa específica do vidro moído



Fonte: Do autor (2018).

O ensaio consistiu em encher o frasco de *Le Chatelier*, que deve possuir 250 cm³, com querosene entre as marcas de 0 a 1 cm³ (FIGURA 30) e deixa-lo em repouso pelo período de 30 minutos para que o líquido entrasse em equilíbrio térmico com o ambiente e então medida a sua massa (V_1).

Figura 30 - Adição de querosene no frasco de Le Chatelier



Fonte: Do autor (2018).

Posteriormente a amostra de vidro moído, que teve sua massa (m) previamente medida, foi adicionada em pequenas proporções de modo que o líquido se elevasse até a marca entre 18 a 24 cm³ (FIGURA 31) e em seguida registrado sua massa (V_2). A massa específica do material foi determinada pela Equação 6.

Figura 31 - Adição de vidro moído no frasco



Fonte: Do autor (2018).

$$\gamma = \frac{m}{V_2 - V_1} \quad (6)$$

Onde:

γ : massa específica (g/cm³);

m : massa de resíduo de vidro moído utilizada para ensaio (g);

V_1 : Massa do conjunto frasco de *Le Chatelier* + líquido (g);

V_2 : Massa do conjunto frasco de *Le Chatelier* + líquido + amostra (g).

3.1.7 Dosagem

Para produção do concreto foi utilizado o traço de referência com proporções de 1:2:3 (cimento : areia : brita), com relação água cimento de 0,5, dosado pelo método ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO *PORTLAND*, 2002) para obtenção de abatimento máximo de 100 mm e mínimo de 25 mm. A substituição parcial da areia pelo vidro moído nas proporções de 10, 20 e 30% estão indicadas na Tabela 10, onde podem ser observados os valores dos traços unitários referentes a cada dosagem.

Tabela 10 - Traço unitário determinado para a pesquisa

Traço	Cimento	Areia	Vidro Moído	Brita	Água
Referência	1	2	-	3	0,5
Areia 90% vidro 10%	1	1,8	0,2	3	0,5
Areia 80% vidro 20%	1	1,6	0,4	3	0,5
Areia 70% vidro 30%	1	1,4	0,6	3	0,5

Fonte: Do autor (2018).

Também foram realizados cálculos de material necessário para que cada traço moldasse 32 corpos de prova cilíndricos, sendo que desses 9 necessários para ensaios de resistência à compressão, 9 para ensaios de resistência à tração por compressão diametral, 3 para ensaios de capilaridade, 3 para ensaios de absorção, 3 para ensaios de corrosão de íons cloretos e 5 para margem de erro para suprir eventuais perdas de material durante a preparação do concreto. A relação das quantidades de cada material utilizado é mostrada na Tabela 11.

Tabela 11 - Traço em massa para confecção de corpos de prova

Traço	Valores de massa em Kg				
	Cimento	Areia	Vidro Moído	Brita	Água
Referência	18,50	36,98	-	55,47	9,25
Areia 90% vidro 10%	18,50	33,29	3,69	55,47	9,25
Areia 80% vidro 20%	18,50	29,58	7,39	55,47	9,25
Areia 70% vidro 30%	18,50	25,89	11,10	55,47	9,25

Fonte: Do autor (2018).

3.2 Concreto

Para os concretos fabricados foram realizados procedimentos em duas etapas. Foram realizados procedimentos no estado fresco do concreto e ensaios no estado endurecido do concreto.

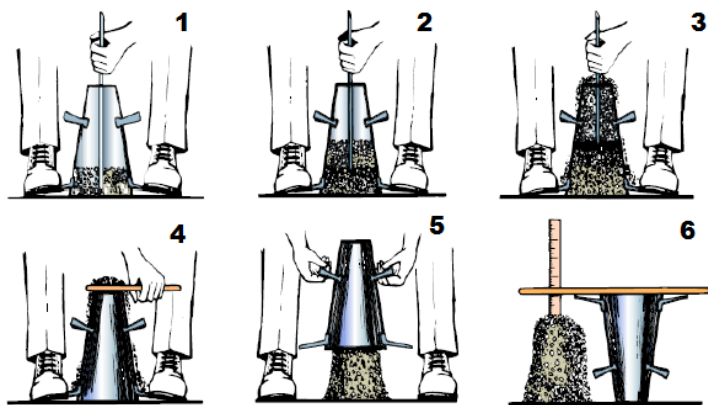
3.2.1 Concreto no estado fresco

Para o estado fresco do concreto foram realizados procedimentos como a verificação de abatimento do concreto, mais conhecido como *slump test*, e também a moldagem dos corpos de prova. O detalhamento destes procedimentos está descrito nos itens que seguem.

3.2.1.1 Slump Test

O teste de *slump* (FIGURA 32) determina o abatimento do concreto, que deve ser de 10 cm, com variação aceitável ± 2 cm. O ensaio foi realizado de acordo com o determinado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) e os materiais utilizados foram chapa metálica, cilindro tronco cônico, haste para adensamento, colher e trena.

Figura 32 - *Slump test*



Fonte: CEM solutions (2017).

Após o concreto ser misturado em betoneira sua consistência foi verificada pelo ensaio de *slump* que consiste em colocar próximo a betoneira uma chapa metálica que serve como base, e sobre ela um cilindro de formato cônico com dimensões de abertura de 10 e 20 cm de diâmetro e altura de 30 cm. Dentro do cilindro foram colocadas 3 camadas de concreto, com aplicação de 25 golpes em cada camada com a utilização de uma haste de aço de 16 mm, sem que a camada inferior fosse tocada. Ao fim dos golpes, a última camada foi desempenada com auxílio de colher de pedreiro.

A próxima etapa foi retirar o molde cônico em sentido vertical e colocá-lo ao lado do concreto para que fosse feita a medida do abatimento. A medida do *slump* consiste na diferença de altura entre o topo do molde metálico e altura resultante do concreto moldado pelo cone (FIGURA 33).

Figura 33 - Abatimento do concreto



Fonte: Do autor (2018).

3.2.1.2 Moldagem de corpos de prova

Com o concreto ainda no seu estado fresco foram moldados 27 corpos de prova para cada traço analisado neste trabalho. A moldagem dos corpos de prova seguiu as etapas de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016), onde os corpos de prova foram moldados em moldes cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura (FIGURA 34), sendo preenchidos por 2 camadas de concreto (FIGURA 35), sendo aplicado 12 golpes em cada camada com o auxílio de haste metálica.

Figura 34 - Moldes cilíndricos para corpos de prova



Fonte: Do autor (2018).

Figura 35 - Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Do autor (2018).

3.2.2 Ensaios para concreto no estado endurecido

3.2.2.1 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) nas idades de 7, 14 e 28 dias, sendo que para cada idade foram registrados a resistência à compressão de 3 corpos de prova de cada traço. A realização do ensaio de resistência à compressão pode ser vista na Figura 36, onde é possível observar a utilização de uma prensa hidráulica que tem capacidade para 2000 kN, modelo SSH300 da marca EMIC.

Figura 36 - Ruptura de corpos de prova à compressão axial



Fonte: Do autor (2018).

3.2.2.2 Resistência à tração

A determinação da resistência à tração foi realizada de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado para as idades de 7, 14 e 28 dias, onde 3 corpos de prova de cada traço. Neste ensaio os corpos de prova foram dispostos em uma prensa hidráulica (FIGURA 37) que tem capacidade para 2000 kN, modelo SSH300 da marca EMIC, configurada para que as a dissipação das forças ocorresse em linhas axiais opostas, resultando em uma compressão por tração diametral. Para obtenção dos resultados de resistência à tração foi necessário realizar os ajustes dos resultados através da Equação 7.

Figura 37 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Do autor (2018).

$$f_{ct,sp} = \frac{2 F}{\pi d l} \quad (7)$$

Onde:

$F_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F = Força máxima obtida no ensaio (N);

d = diâmetro do corpo de prova (mm);

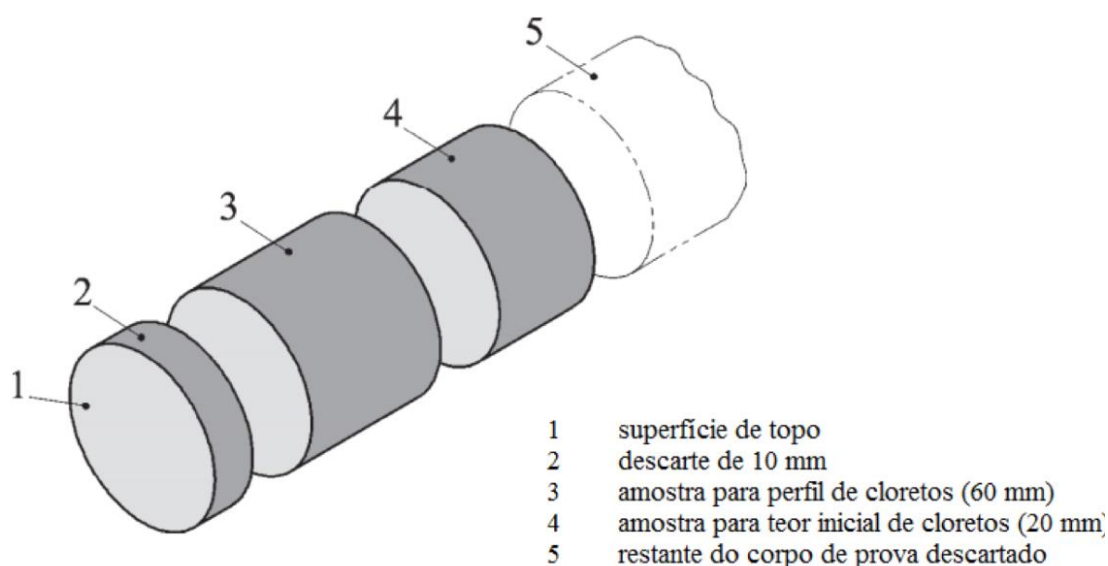
l = comprimento do corpo de prova (mm).

3.2.2.3 Corrosão de íons cloretos

O concreto produzido foi submetido ao ensaio de corrosão por íons cloretos, que é estabelecido pela norma britânica CEN/TS 12390-11 (2010). Para este ensaio foram moldados 3 corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço e foram curados até a idade de 14 dias.

Após os 14 dias os corpos de prova foram fracionados com o uso de disco diamantado em 4 partes, originando sub-amostras conforme Figura 38. Para o ensaio de cloretos foram desprezadas as partes 2, 4 e 5 representadas na legenda da Figura 38.

Figura 38 - Divisão de corpos de prova para ensaios de cloretos



Fonte: Costa (2015, p. 85).

Pelo fato de apenas uma parte do ensaio de cloretos poder ser realizado neste estudo, tendo em vista a falta de equipamentos para a realização do ensaio por completo, o ensaio de cloretos foi adaptado da norma britânica CEN/TS 12390-11 (2010), utilizando-se uma camada de 6 cm de cada corpo de prova, como a parte 3 da Figura 39, obtida da parte central dos mesmos. Após fracionados, os corpos de prova tiveram suas laterais impermeabilizadas com selante poliuretano (FIGURA 40).

Figura 39 - Corpos de prova fracionados



Fonte: Do autor (2018).

Figura 40 - Impermeabilização das amostras



Fonte: Do autor (2018).

Dando sequência ao ensaio, as amostras foram dispostas em um tanque com solução de 3% de cloreto de sódio (NaCl) conforme Figura 41. As amostras permaneceram na solução pelo período de 70 dias, que foi o período máximo possível para a realização deste ensaio.

Figura 41 - Solução com 3% de cloretos



Na figura da esquerda observa-se a proporção de 3% de cloretos separada para posterior mistura em água para obter a solução de cloretos da figura da direita. Fonte: Do autor (2018).

Passados os 70 dias, as amostras foram rompidas em duas metades através de compressão diametral (FIGURA 42). A partir das metades obtidas, para obtenção do perfil de profundidade de penetração de cloretos das amostras, foi aspergido solução de nitrato de prata (solução 0,1N AgNO_3) nas amostras, obtendo a espessura média em que os cloretos adentraram nas amostras.

Figura 42 - Ruptura das amostras de cloretos



Fonte: Do autor (2018).

3.2.2.4 Capilaridade

A absorção de água pelo concreto, por meio de sua capilaridade, foi determinada com o ensaio prescrito na NBR 9779 (ABNT, 2012). O ensaio foi realizado para a idade de 28 dias e foram moldados 3 corpos de prova para cada traço com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para o ensaio foram utilizados balança, estufa e recipientes para alocação dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram previamente secos em estufa à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ pelo período de 24 horas e medido sua massa. Posteriormente as amostras foram dispostas em recipientes com lâmina d'água de 5 ± 1 mm acima de sua face inferior, conforme Figura 43.

Para os intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas foram registrados os valores de massa de cada amostra, sendo que as mesmas foram enxugadas com pano úmido e ligeiramente voltaram à lâmina d'água após ter sua massa registrada. A absorção da

água por capilaridade dos concretos foi determinada através da Equação 8. Após todos os registros de massa serem feitos, as amostras foram rompidas diametralmente em duas metades para verificação da ascensão de água na parte interna do concreto

Figura 43 - Absorção de água por capilaridade



Fonte: Do autor (2018).

$$C = \frac{A - B}{S} \quad (8)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade, em g/cm²

A = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces submersas em água durante um intervalo de tempo, em g.

B = massa do corpo de prova após ser seco e estar a 23°C, em g.

S = área da seção transversal, em cm².

3.2.2.5 Absorção e índice de vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios dos corpos de prova estudados, foi feito conforme preconiza a NBR 9778 (ABNT, 2005). Este ensaio foi realizado aos 28 dias e foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos para cada traço com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Para a realização do ensaio foram utilizados balança, estufa, e recipiente para fervura das amostras.

Para o ensaio as amostras foram previamente secas em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ pelo período de 72 horas e então tiveram suas massas registradas (m_s). Posteriormente os corpos de prova foram imersos em água dentro de um tonel (FIGURA 44) pelo período de 72 horas.

Figura 44 - Imersão de corpos de prova por 72 horas



Fonte: Do autor (2018).

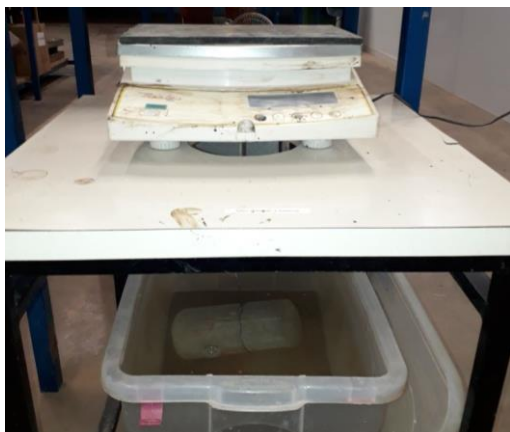
Completado o período de imersão os corpos de prova foram fervidos dentro de um recipiente (FIGURA 45) pelo período de 5 horas. Após a etapa de fervura as amostras tiveram sua massa registrada submersos em água com auxílio de balança hidrostática (m_i) observado na Figura 46.

Figura 45 - Fervura de amostras



Fonte: Do autor (2018).

Figura 46 - Registro de massa da amostra submersa



Fonte: Do autor (2018).

Por fim cada amostra foi enxugada com pano úmido e mais uma vez teve sua massa medida na condição saturado (m_{sat}) (FIGURA 47). A absorção da água é calculada pela Equação 9 e o índice de vazios é calculado pela Equação 10.

Figura 47 - Amostra na condição saturada



Fonte: Do autor (2018).

$$Ab = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

Ab = Absorção de água por imersão (%);

m_{sat} = Massa do corpo de prova saturado (g);

m_s = Massa do corpo de prova seco (g).

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (10)$$

Onde:

I_v = Índice de vazios (%);

m_i = Massa do corpo de prova saturado, imerso em água (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do vidro moído

Os resultados que são apresentados são da moagem de aproximadamente 1500 g de vidro pelo período de 10 minutos em moinho mecânico de bolas. Outros ensaios foram realizados com maiores e menores quantidades de vidro, bem como maiores e menores intervalos de tempo de moagem, porém foi utilizado como base o que mais se assemelhou aos resultados da areia.

4.1.1 Granulometria do vidro moído

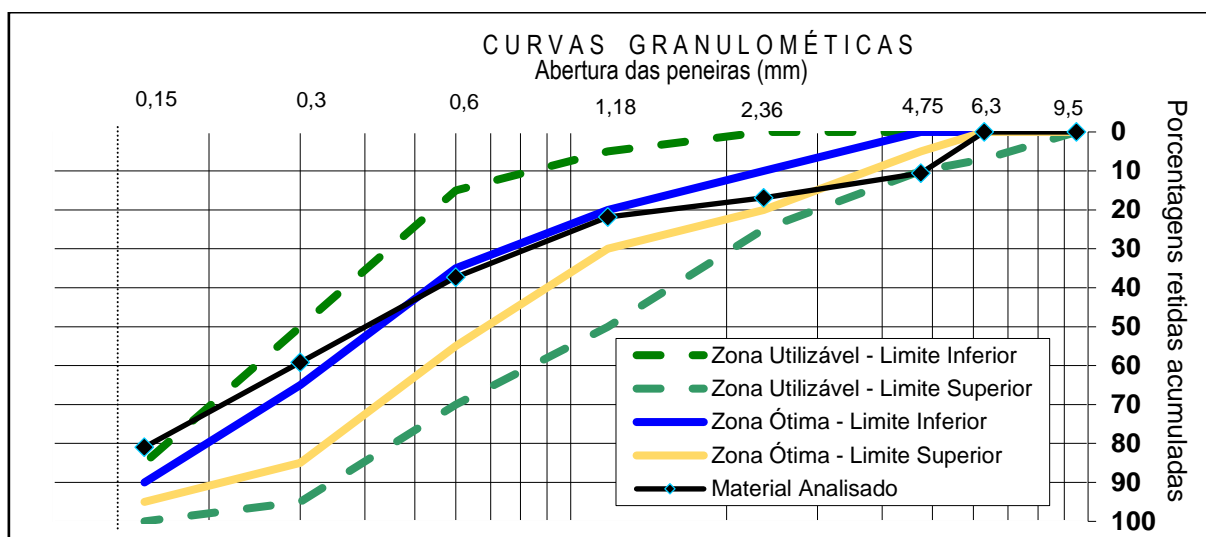
A curva granulométrica do vidro moído obtida após moagem e ensaio de granulometria gerou o Gráfico 9 e os resultados são apresentados na Tabela 12, onde observa-se que o módulo de finura do vidro moído obteve valor de 2,27, ficando dentro do intervalo de valores entre 2,20 a 2,90, considerados pela NBR 7211 (ABNT, 2009) como zona ótima. O MF também apresentou um valor muito próximo ao valor encontrado no ensaio de granulometria da areia utilizada que foi de 2,36. O diâmetro máximo característico do vidro encontrado foi de 6,30 mm. Na tabela ainda é possível verificar que a porcentagem de material retido no fundo representa uma parte considerável do montante, ficando em 19% de material que passou pela peneira de 150 μm .

Tabela 12 - Distribuição granulométrica do vidro moído

Malha das peneiras (mm)	massa inicial seca (g) =	1.477,4	Massa retida (%)	Massa acumulada (%)
	Massa retida (g)	Massa retida (%)		
9,5	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
6,3	0,0	0,0%	0,0%	0,0%
4,75	155,9	10,6%	10,6%	10,6%
2,36	93,5	6,3%	6,3%	16,9%
1,18	73,0	4,9%	4,9%	21,8%
0,6	228,9	15,5%	15,5%	37,3%
0,3	323,3	21,9%	21,9%	59,2%
0,15	321,4	21,8%	21,8%	81,0%
Fundo	281,4	19,0%	19,0%	100,0%
Total	1.477,4	Módulo de Finura = 2,27	DMC= 6,30 mm	

Fonte: Do autor (2018).

Gráfico 9 - Granulometria do vidro moído



Fonte: Do autor (2018).

Pelo Gráfico 9 é possível verificar que os grãos de vidro moído com diâmetro de 150 μm ultrapassaram a curva de limite inferior considerada pela NBR 7211 (ABNT, 2009) como utilizável, o que indica que seria necessária uma maior porcentagem de grãos desse diâmetro para a composição granulométrica do vidro moído. Por outro lado, os grãos com diâmetro de 4,75 mm se apresentam no limite superior considerado como utilizável, não ficando fora do aceitável, porém fora da zona considerada como ótima pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

4.1.2 Massa unitária e massa específica do vidro moído

O valor de massa unitária do vidro moído encontrado foi de 1,36 g/cm³ e a massa específica foi de 2,48 g/cm³. Comparando os resultados com os obtidos para a areia, tem-se que a massa unitária do vidro moído apresenta uma variação de -18% em relação a da areia. Já a massa específica registrou aproximadamente 1,2% de variação do valor do outro agregado.

4.2 Slump test

Os resultados do teste de abatimento (*Slump test*) para cada traço estão apresentados na Tabela 13. O resultado do abatimento faz relação com a quantidade de aditivo superplastificante utilizada, também apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Abatimento dos traços

Traço	REF	10%	20%	30%
Abatimento (cm)	10	9,8	8	7,4
Aditivo superplastificante (%)	-	0,35	0,6	0,7

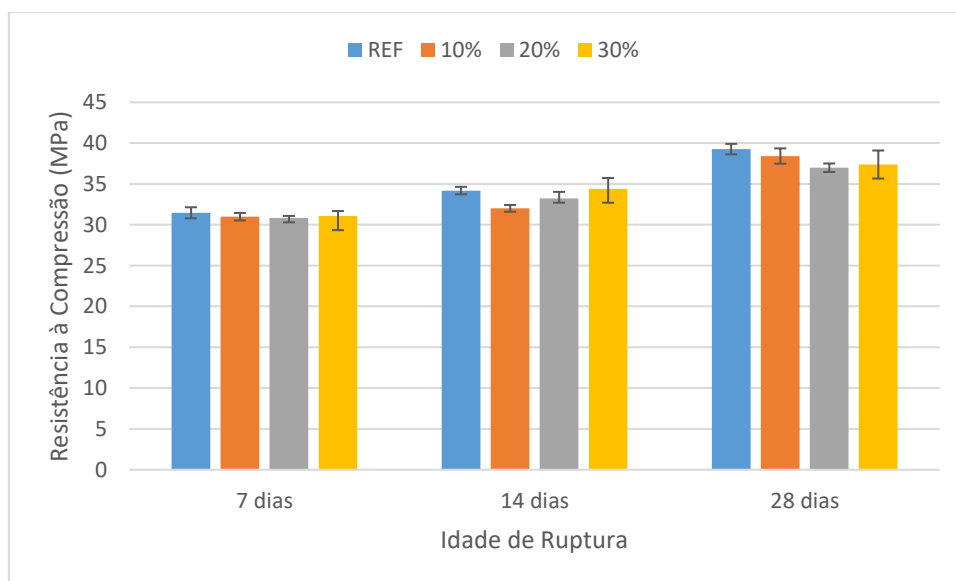
Fonte: Do autor (2018).

O resultado apresenta um aumento no uso de aditivo superplastificante de acordo com o aumento das proporções de vidro moído na mistura. Com esse resultado observa-se que há um maior consumo de água pelas partículas de vidro moído. Isso ocorre segundo Silva e Campiteli (2006) devido a redução da faixa granulométrica do resíduo que foi incorporado, que quando em maiores quantidades apresenta uma área superficial maior de partículas absorventes, aumentando por consequência a quantidade de água necessária para hidratação. Analisando visualmente o vidro moído, bem como sua curva granulométrica confirma-se a afirmação do autor, visto que o vidro moído utilizado apresenta maior quantidade de finos do que a areia.

4.3 Resistência à compressão simples

A resistência à compressão de cada idade ensaiada (7, 14 e 28 dias) assim como a comparação entre as resistências de cada traço são apresentadas no Gráfico 10. Por meio do gráfico é possível observar que na idade de 7 dias de ruptura, todos os traços com substituição parcial da areia pelo vidro moído apresentaram resistência equivalente ao do traço de referência. Para a idade de 14 dias os resultados mostram que os concretos com substituição da areia nas porcentagens de 10 e 20% apresentaram resistência ligeiramente inferior ao traço de referência (REF), ao contrário do traço com substituição de 30% que apresentou resistência ligeiramente superior ao traço de referência. Já na idade de 28 dias, nota-se que os traços de 10% e 30% apresentaram uma resistência similar ao traço de referência quando se analisa que os desvios-padrão das amostras analisadas se cruzam entre eles.

Gráfico 10 - Resistência à compressão simples



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a resistência em particular de cada traço nas respectivas idades de ensaio, percebe-se que todos os traços resultaram em um aumento de resistência ao passar da idade, sendo que o traço com adição de vidro moído que apresentou o maior aumento médio foi o com 10%, com elevação da resistência à compressão em 23,97% ou 7,43 MPa, registrando resistência aos 28 dias de aproximadamente 38,50 MPa. Os traços de 20 e 30% de substituição de areia obtiveram aos 28 dias um

aumento de aproximadamente 20% em relação a sua resistência aos 7 dias, resultado em valores de resistência à compressão de 37 e 37,38 MPa respectivamente.

Ao ser analisada todas as idades de estudo é possível perceber que os dois traços que obtiveram melhores resultados foram as porcentagens de 10% e 30%. Os resultados indicam uma possível atividade pozolânica do material, pois todos apresentam um acréscimo de resistência entre os 7 e 28 dias, de acordo com Pereira *et al. apud* Simões (2013, p. 54) que obtiveram resultados análogos aos desta pesquisa. Simões (2013) comenta que a evolução tardia da resistência pode estar relacionada com o comportamento pozolânico que o vidro está exercendo na mistura, de modo com que o aumento de resistência seja evidenciado apenas em idades mais avançadas. Para que se possa confirmar a atividade pozolânica do resíduo utilizado nesta pesquisa é necessário realizar novos ensaios específicos para que a mesma possa ser afirmada, até o momento este trabalho indica uma possibilidade que isso tenha ocorrido.

Os resultados obtidos corroboram com os já apresentados por Righi *et al.* (2012). Comparando os resultados obtidos neste estudo com os resultados dos autores que o embasaram, verifica-se que alguns autores obtiveram resistência à compressão crescente a partir de maiores acréscimos de vidro moído, bem como resultados que superam a resistência do traço de referência. Righi *et al.* (2012) verificaram que utilizando vidro moído de garrafas *long-neck* brancas a resistência à compressão diminui com proporções de até 15% de vidro, e que aumentou na proporção de 100%. Ozkan e Yuksel *apud* Simões (2013, p. 53) realizaram o ensaio com diferentes tipos de vidro e diferentes cores, mostrando que há grande variabilidade de resultados de acordo com as características do material utilizado.

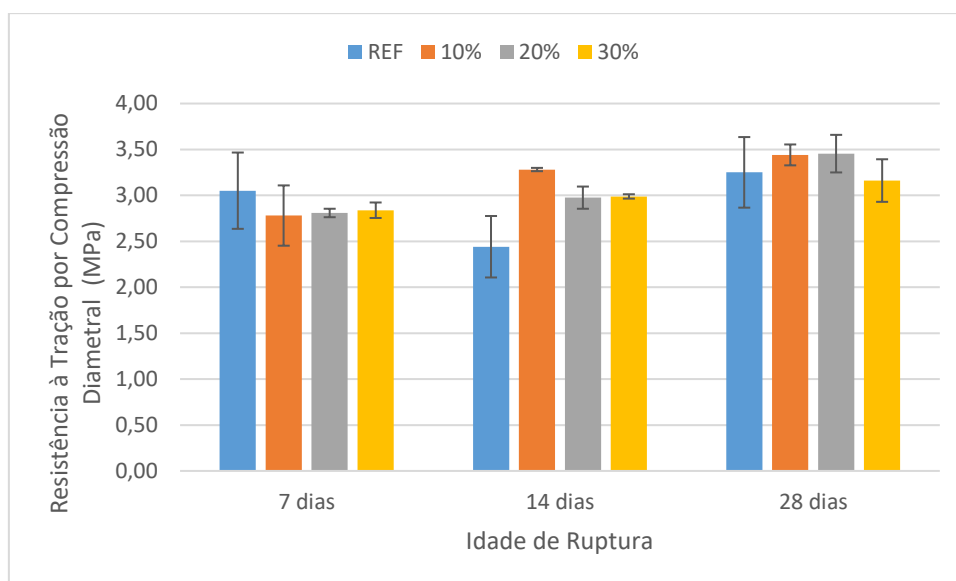
4.4 Resistência à tração por compressão diametral

Embora os elementos de concreto sejam projetados para resistirem a esforços de compressão, as tensões de tração não devem ser ignoradas, pelo fato de que geralmente as fissurações em concretos são resultantes de rupturas à tração (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os resultados de resistência à tração através do ensaio de

compressão diametral são apresentados no Gráfico 11, onde estão dispostos os valores de resistência dos respectivos traços, bem como das idades ensaiadas (7, 14 e 28 dias).

Os valores registrados mostram que na idade de 7 dias todos os traços com adição de vidro moído apresentaram resistência inferior ao traço de referência. Já na idade de 14 dias os resultados apontam para um decréscimo de resistência do traço de referência, acredita-se que este comportamento diferenciado pode ser resultado de um ruído experimental nos resultados, que não conseguiu ser eliminado durante o tratamento de valores atípicos. Em relação ao seu resultado aos 7 dias, todos os traços com adição de vidro moído apresentaram aumento em sua resistência à tração, tendo o traço de 10% o melhor resultado. No ensaio aos 28 dias, o traço de referência volta a ter aumento na sua resistência, porém ficam abaixo dos traços com adição de 10 e 20% de vidro moído, tendo resistência análoga ao traço de 30% de substituição de areia.

Gráfico 11 - Resultado de resistência à tração



Fonte: Do autor (2018).

Ao analisar os resultados, observa-se que todos os traços apresentaram acréscimo de resistência ao passar da idade, com exceção do traço de referência ensaiado aos 14 dias, o qual apresentou uma diminuição em sua resistência, que pode estar diretamente relacionada novamente a ruídos experimentais que não puderam ser eliminados durante o tratamento de espúrio dos resultados. O traço com melhor resistência foi o traço com 10% de adição, que teve um aumento de resistência de

23,75% ou 0,66 MPa aos 28 dias em relação ao ensaio de 7 dias, ficando com valores de resistência superiores ao traço REF, que teve um aumento de 6,53% ou 0,2 MPa, assim como o traço de 20% também registrou maior resistência, com aumento de 23% ou 0,65 MPa. O traço de 30% de adição de vidro moído, apesar de registrar resistência aos 28 dias inferior ao traço de REF, apresentou um aumento superior em relação a sua resistência aos 7 dias, com 11,38% ou 0,32 MPa, comparado com o aumento de 0,2 MPa do traço REF.

4.5 Corrosão de íons cloretos

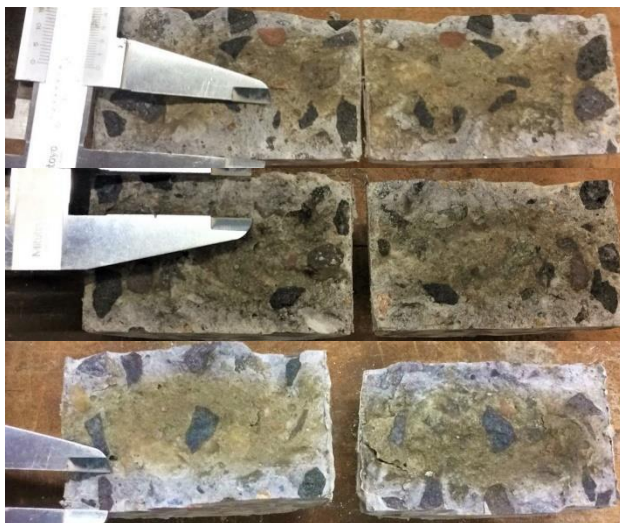
Na Figura 48 a seguir é mostrado os resultados do ensaio de corrosão por íons cloretos dos traços produzidos neste estudo. Todas as amostras permaneceram em solução de cloreto de sódio (NaCl) pelo período de 70 dias. Após a aspersão da solução de nitrato de prata nas amostras, a parte clara representa onde ocorreu o ataque de cloretos, e a parte escura onde não houve a penetração de cloretos. As leituras foram realizadas em 5 pontos de cada face do corpo de prova e após isso foi realizada uma média dessas leituras. Na Figura 49 é apresentado o resultado do ensaio no traço de Referência, onde se obteve uma média da penetração de cloretos de 17 mm.

Figura 48 - Ataque de cloretos nas amostras



Fonte: Do autor (2018).

Figura 49 - Perfil de cloretos traço REF.



Fonte: Do autor (2018).

A profundidade de cloretos do traço 10% é visto na Figura 50. Para esse traço o valor médio de penetração de íons cloretos foi de 16,5 mm, tendo uma diminuição média de 0,5 mm em relação ao traço referencial.

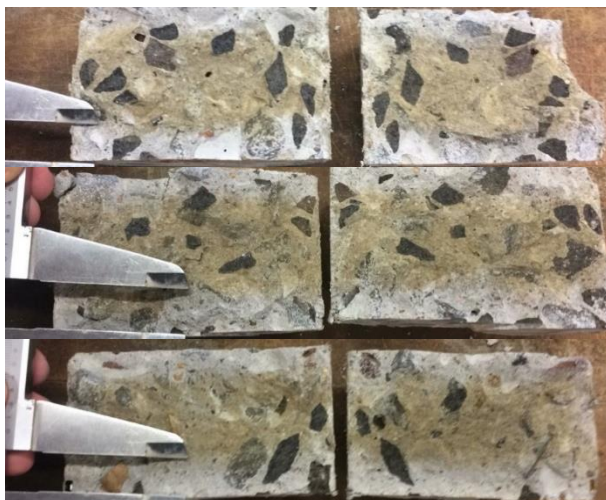
Figura 50 - Perfil de cloretos traço 10%



Fonte: Do autor (2018).

A Figura 51 mostra os resultados obtidos para o traço com adição de 20% de vidro moído. A penetração de cloretos obtida foi de 15 mm, o que comprado com o traço de referência significa uma diminuição de 2 mm, e de 1,5 mm se comparado ao traço 10%.

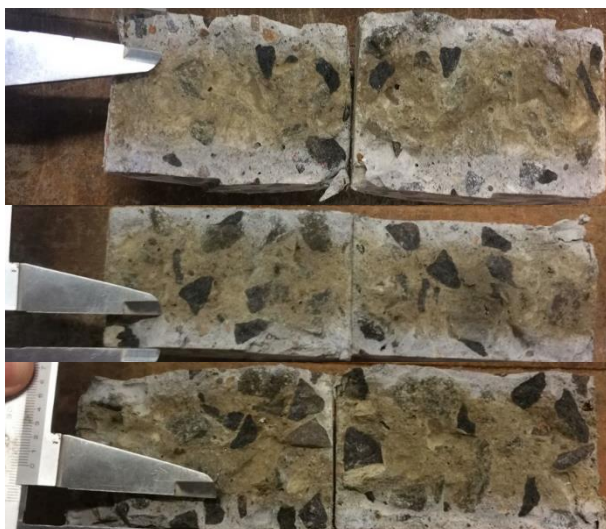
Figura 51 - Perfil de cloretos traço 20%



Fonte: Do autor (2018).

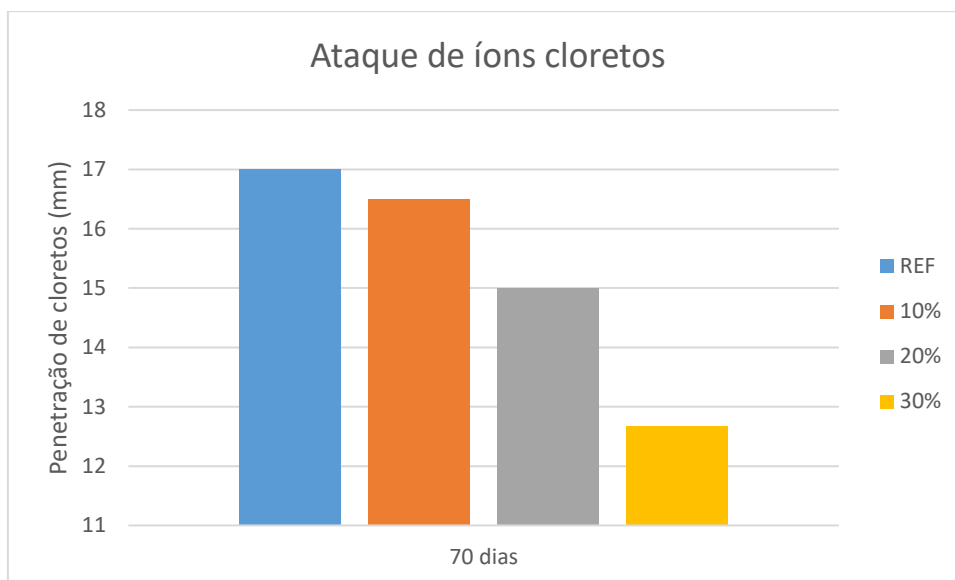
O resultado da profundidade de penetração de íons cloretos do traço 30% é observado na Figura 52, sendo que o resultado obtido para este traço foi de aproximadamente 12,67 mm, sendo o traço que apresentou menor penetração de cloretos dentre todos analisados e tendo uma diminuição de 4,33 mm se comparado com o traço REF. No Gráfico 12 é apresentado o resultado de todos os traços após 70 dias submersos em solução para ataque de cloretos, sendo que a diferença entre o traço que obteve maior facilidade de penetração (REF.) e o de menor facilidade (traço 30%) foi de aproximadamente 34%. Nele é possível observar que à proporção que se aumenta a quantidade de vidro moído ao concreto, até a proporção de 30% estudada, a penetração de cloretos diminui.

Figura 52 - Perfil de cloretos traço 30%



Fonte: Do autor (2018).

Gráfico 12 - Profundidade de penetração de íons cloretos



Fonte: Do autor (2018).

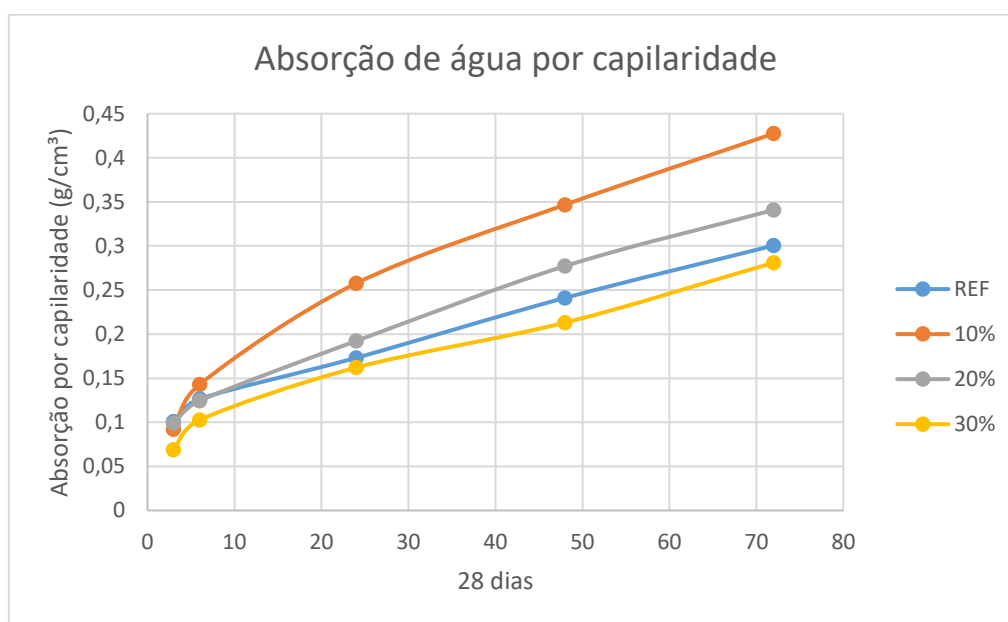
Em ambientes marinhos é comum a presença de cloretos, nesse caso o NaCl, que são os responsáveis pela corrosão das armaduras nos concretos (TIECHER, 2006). A corrosão faz com que o aço das armaduras retorne ao estado de óxido de ferro, sendo que no concreto esse processo é acelerado pela presença de cloretos ou redução do pH através da carbonatação (TORRES, 2011). Os resultados desta pesquisa mostram que quanto maior foi a proporção de vidro moído adicionada ao concreto, menor foi a penetração de cloretos nas amostras, isto se deve ao refinamento dos poros contidos no concreto. Os resultados ainda corroboram os estudos de Matos e Sousa-Coutinho (2012) e Nassar e Soroushian (2012), que substituíram Cimento *Portland* por resíduo de vidro de diferentes granulometrias e constaram a maior dificuldade de penetração de cloretos em concretos que possuíam pó de vidro em sua composição.

4.6 Capilaridade

De acordo com Silva e Campiteli (2006) a ascensão de água por meio da capilaridade está relacionada à acomodação das partículas no interior do concreto, relacionando também o volume de penetração de água com o tamanho de partículas capilares, sendo que quanto menor for a partícula capilar, maior será a capilaridade no concreto.

Os resultados obtidos no ensaio de capilaridade estão expressos no Gráfico 13, onde observa-se que os traços com adição de vidro moído, exceto o de 30%, apresentam maior absorção de água em comparação ao traço de referência. O traço com 10% de vidro moído na medição feita às 72 horas apresenta o maior valor, sendo 40% superior ao traço de referência, seguido do traço com 20% de vidro moído, que possui capilaridade de aproximadamente 13% superior à de referência. O traço de 30% apresentou capilaridade de -6,50% comparado ao traço de referência. É importante lembrar que neste ensaio, os corpos de prova não foram serrados, portanto o fator “efeito parede” influencia, de certa forma, os resultados do experimento. Essa diminuição da absorção de água por capilaridade para o traço de 30% pode ser devido ao refinamento dos poros, visto que o vidro moído possui muito mais finos do que o agregado miúdo natural.

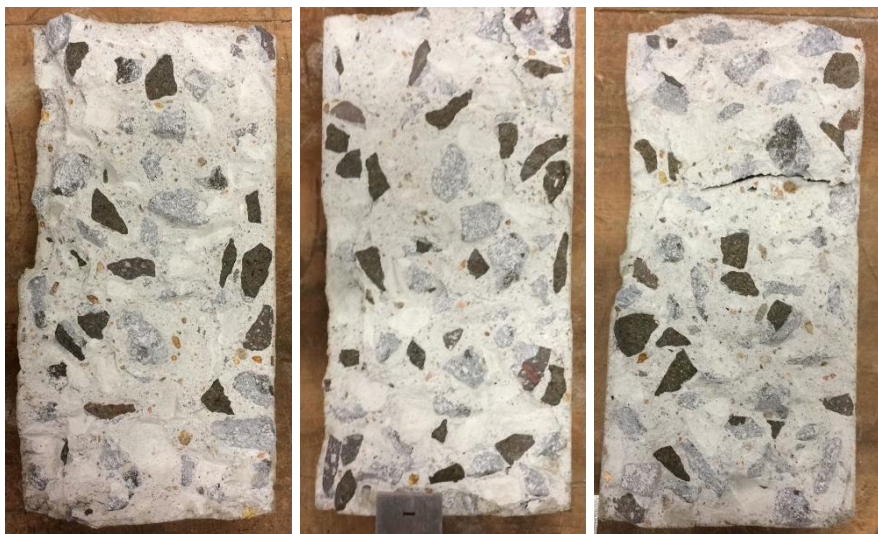
Gráfico 13 - Curva de absorção de água por capilaridade



Fonte: Do autor (2018).

As análises internas da ascensão capilar das amostras são visualizadas nas figuras a seguir. A Figura 53 apresenta as 3 amostras rompidas referentes ao traço de referência. Nas amostras não foi possível verificar visualmente a ascensão de água através da capilaridade.

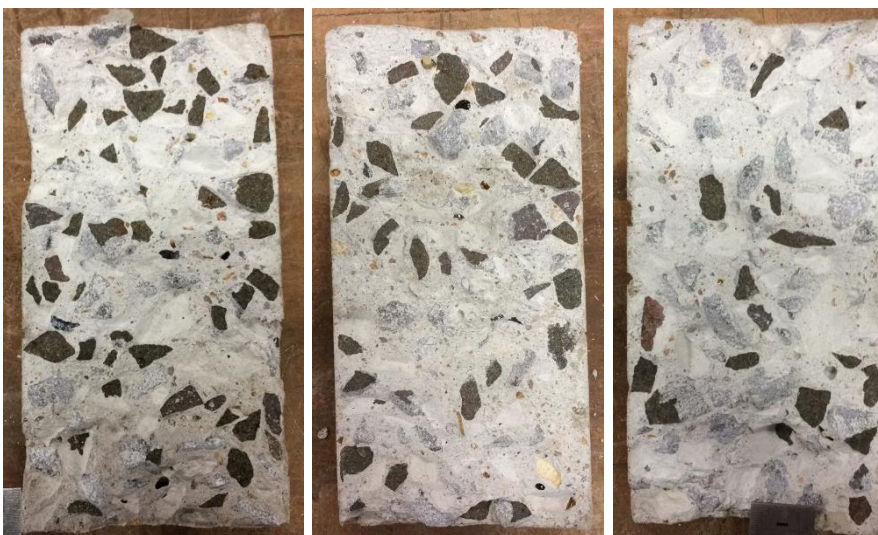
Figura 53 - Ascensão capilar interna Traço REF.



Fonte: Do autor (2018).

A Figura 54 se refere aos corpos de prova do traço com adição de 10% de vidro moído. Nessas amostras, apesar de ser o traço que apresentou através da pesagem, a maior ascensão capilar, também não foi possível visualizar umidade interna visualmente.

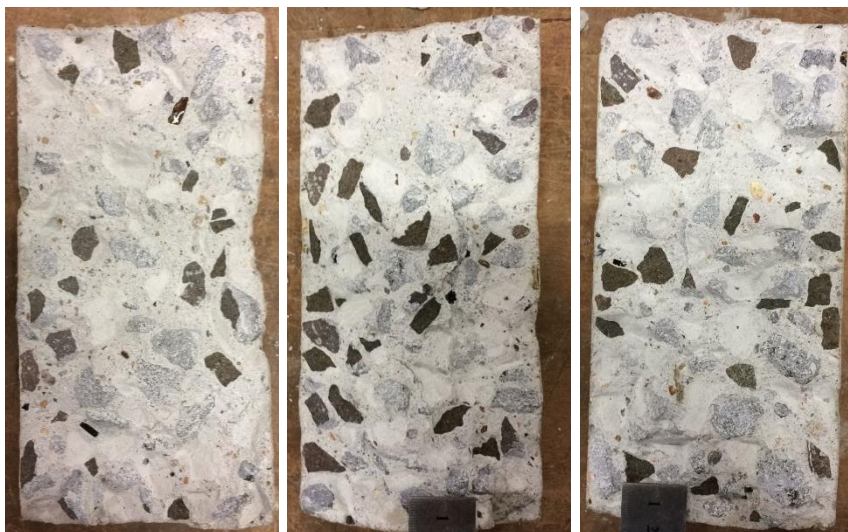
Figura 54 - Ascensão capilar interna traço 10%



Fonte: Do autor (2018).

Os corpos de prova referentes ao traço com 20% de adição de vidro moído estão mostrados na Figura 55. Para essas amostras também não houve a possibilidade visual de verificar a presença de umidade interna nas amostras.

Figura 55 - Ascensão capilar interna traço 20%



Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 56 são mostradas as amostras com composição de 30% de vidro moído. Das 3 amostras, duas apresentaram variação de coloração interna, o que possibilitou a verificação e medição da altura em que a água penetrou através do ensaio, que foi em média de 5,50 cm. Apesar deste traço ter sido o que registrou menor capilaridade através do ensaio de medição de massas, foi o único que apresentou amostras que possibilitaram a verificação da umidade interna do concreto.

Figura 56 - Ascensão capilar interna traço 30%

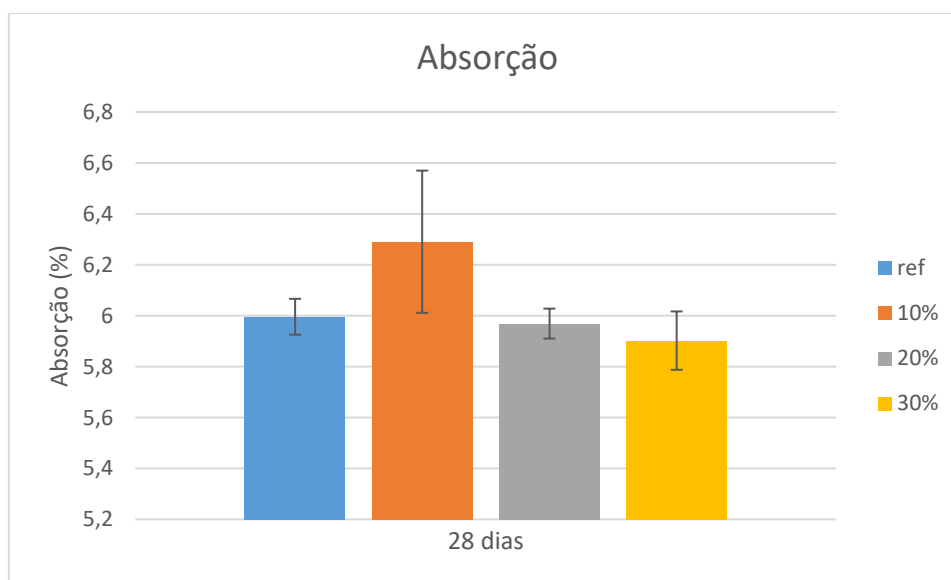


Fonte: Do autor (2018).

4.7 Absorção e índice de vazios

Os resultados encontrados no ensaio para absorção estão expressos no Gráfico 14, onde observa-se que o traço que registrou a maior absorção entre todos os traços analisados foi o de 10% de vidro com 6,30% de absorção, um aumento de aproximadamente 4,90% em relação ao traço REF. Os traços de 20 e 30% apresentaram absorção inferior ao traço de referência, que registrou 6% de absorção, tendo absorção de 5,96% e 5,90%, respectivamente. A diferença entre o maior e menor valor de absorção registrado foi de 6,58%.

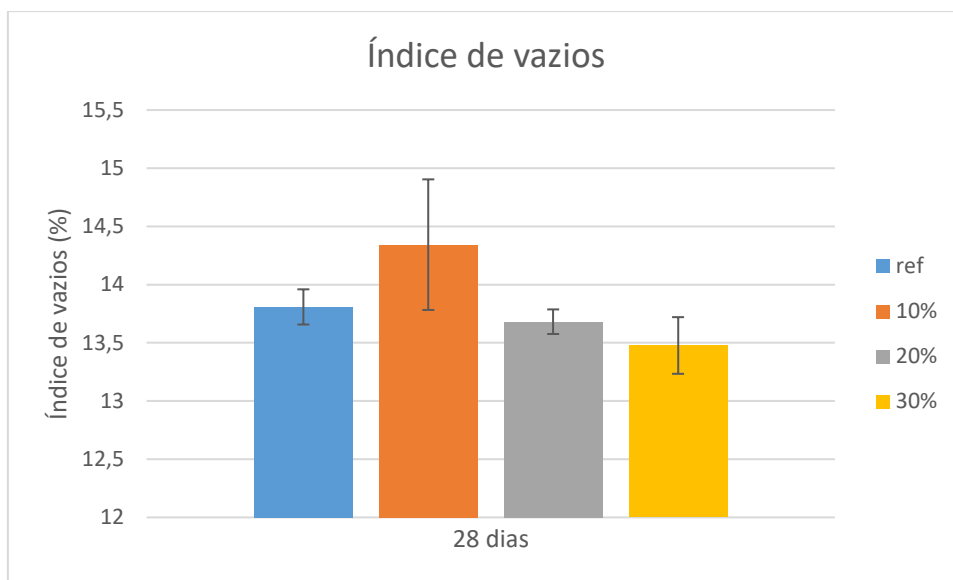
Gráfico 14 - Absorção do concreto



Fonte: Do autor (2018).

Os valores de índice de vazios são mostrados no Gráfico 15, sendo que os resultados se apresentam análogos aos resultados de absorção, tendo o traço 10% a maior porcentagem de vazios, sendo 3,87% maior em comparação ao traço de referência e 6,42% maior que o traço que apresentou o menor índice (traço 30%). O traço REF apresentou resultado de 13,80% de índice de vazios, com valor superior aos traços de 20 e 30% que registraram respectivamente 13,68% e 13,47%.

Gráfico 15 - índice de vazios



Fonte: Do autor (2018).

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nesse estudo foi possível chegar às seguintes conclusões e considerações indicadas abaixo.

5.1 Conclusões e considerações

O estudo do comportamento mecânico dos concretos produzidos resultou em dados de resistência à compressão que já eram esperados. O traço com adição parcial de vidro moído em substituição do agregado miúdo obteve duas porcentagens que ganharam maiores destaques que foram 10% e 30%, sendo que a porcentagem de 10% obteve um maior valor médio, mas devido à grande variabilidade dos resultados encontrados a porcentagem de 30% se torna uma possibilidade de uso devido aos desvios-padrão se cruzarem com o traço de referência. Em relação ao comportamento à tração desses concretos estudados, se repete os mesmos resultados de resistência à compressão, onde as mesmas porcentagens ganharam mais destaque, indo ao encontro dos resultados de compressão.

Em relação à caracterização do resíduo de vidro moído, os resultados ficaram bem próximos ao do agregado miúdo natural, resultando uma maior quantidade de pó. O grande desafio para a sua caracterização foi encontrar o tempo de moagem ideal para que se equiparasse ao agregado natural. Ensaio de índice de atividade pozolânica devem ser realizados para que se possa confirmar ou não se o vidro moído contribuiu em termos de resistência nos concretos estudados.

A análise da durabilidade dos concretos produzidos, realizada através dos ensaios de corrosão de íons cloretos, capilaridade, absorção e índice de vazios, aponta o traço com 30% de vidro moído como o melhor resultado para ambos os ensaios, por isso se torna uma possibilidade mais atrativa pois alia resistências e durabilidade como melhor otimização dos resultados.

Com base em todos os resultados analisados de resistência e durabilidade conclui-se que o traço com adição de vidro moído que apresentou o melhor resultado foi o traço de 30%, mesmo tendo apresentado uma resistência ligeiramente inferior ao traço de 10%, acreditando-se que os ensaios deveriam ser repetidos para confirmação dos dados. Como pode ser visto nesse trabalho, as adições de vidro moído ao concreto não apresentaram perda de resistência à compressão, portanto acredita-se que sua utilização seja viável, levando em conta resultados de resistência mecânica, não verificando custos de transporte, coleta, e preparação, além ainda de evitar que esse material vá para aterros.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

A composição do vidro apresenta sílica, que pode vir a reagir com os álcalis do cimento, que com a presença de umidade gera uma espécie de gel que é expansivo e prejudicial ao concreto. Desta forma indica-se para trabalhos futuros a realização do ensaio de álcali-sílica.

Como nesse estudo não foi realizada a viabilidade econômica para o recolhimento, transporte, separação e preparação do vidro para utilização, sugere-se para futuros trabalhos que seja feita a análise da viabilidade econômica da utilização desse material.

Indica-se ainda para trabalhos futuros:

- Análise da atividade pozolânica do vidro moído;
- Repetitividade dos ensaios de resistência à compressão;
- Adição do vidro ao concreto como substituto do cimento;

- Realização do ensaio de módulo de elasticidade de concretos fabricados com vidro moído.

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústria Automáticas de Vidro. Disponível em: <www.abividro.org.br>. Acesso em: 01 nov. 2017.

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano. Disponível em: <www.abraavidro.org.br>. Acesso em: 27 out. 2017

ADAMS, Guilherme. **Obtenção e caracterização de vidro expandido a partir de vidro de para-brisa de carro**. 2014. 53 f. Trabalho de diplomação em Engenharia dos Materiais – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ANAVIDRO – Associação Nacional de Vidraçarias. Disponível em: <www.anavidro.com.br/quando-um-raio-atinge-a-areia-arte-em-vidro>. Acesso em: 21 fev. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo: ABCP, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199**: Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7225**: Materiais de pedra e agregados naturais – Terminologia. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14697**: Vidro laminado. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados — Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 297:** Vidro impresso. Rio de Janeiro, 2004.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **Testing hardened concrete – part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion.** DD CEN/TS 12390-11. London, UK, 2010.

BÜNEKER, Adriana de Oliveira Blazoudakis. **Influência da transmitância térmica do vidro no consumo de energia para o conforto ambiental – estudo de caso.** 2012. 72 f. Monografia (Pós-Graduação) – Curso de Pós-Graduação em Sustentabilidade e Eficiência Energética em Edificações, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, nov. 2012.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. **Ceramic Materials: Science and Engineering.** 2. Ed. Nova York: Springer, 2014.

CEBRACE 2017. **O Vidro.** Disponível em: <www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia/interna/a-historia-do-vidro>. Acesso em: 01 nov. 2017.

CEM Solutions. Construction Engineering & Management. Disponível em: <www.cemsolutions.org/concrete-slump-test>. Acesso em: 27 out. 2017.

CEMPRE. 2017. **Consórcio Empresarial para a Reciclagem.** Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: 01 nov. 2017.

CLASSI VIDROS. Disponível em: <www.claccividros.com.br/produtos/vidros/>. Acesso em: 27 out. 2017.

CORDEIRO, Rafael dos Santos; MONTEL, Adão L. Bezzerra. Estudo da viabilidade para a produção de concretos com adição de resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo na cidade de Palmas/TO. **Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins**, Palmas, Tocantins, V. 2, n. Especial, p. 104-123, 2015. Disponível em: <<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios/article/view/1556>>. Acesso em: 15 out. 2017.

CRENTSIL, K. S., BROWN, T., TAYLOR, A., **Recycled glass as sand replacement in premix concrete.** Ed. Eco-Recycled Australia and CSIRO, 2001.

DALLAQUA, Bruno. **Desenvolvimento de embalagem conceito para cerveja artesanal inspirada em art déco.** 2016. 94 f. Monografia (Graduação) – Curso de Design, Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, Lajeado, nov. 2016.

FÁVERO, R. B. **Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento.** 2009. 79 f. Trabalho de Diplomação (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, jul. 2009.

FERREIRA, Armando Preizal. **Estudo experimental da resistência de blocos de concreto com vidro como agregado miúdo**. 2015. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

LÓPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; NETO, E. Barbosa. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino**. 2005. Artigo. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v51n320/29526.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2017.

MAIA, Samuel Berg. **O vidro e sua fabricação**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MATOS, Ana Mafalda; RAMOS, Telma; NUNES, Sandra; SOUSA-COUTINHO, Joana. **Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder**. 2016. Artigo.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA -COUTINHO, Joana. **Durability of mortar using waste glass poder as cement replacement**. Construction and Building Materials, n. 36, p. 205-2015, 2012.

MAXIMO, Oneida Heiderick. **Desempenho térmico de compostos cimentícios produzidos com adição de micropartículas de resíduo de vidro**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em construção civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MUNDO EDUCAÇÃO. Disponível em: <www.mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/reciclagem-vidro.htm>. Acesso em: 27 out. 2017.

NASCIMENTO, Winny Fernanda; SANTOS, Davidson Araújo; SILVA, Breno Alcântara; TEMPONI, Gabriela Jordão; ANDRADE, Diego; LUZ, Brisa Souza; ALEXANDRINO, Carlos Henrique; CARLI, Alessandra de Paula. **Caracterização de compósitos de concreto utilizando agregado miúdo do vidro**. 2014. Artigo apresentado no XI Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas. Disponível em: <<http://meioambientepocos.com.br/portal/anais/2014/arquivos2014/CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20DE%20COMP%C3%93SITOS%20DE%20CONCRETO%20UTILIZANDO%20AGREGADO%20MI%C3%9ADO%20DO%20VIDRO.doc>>. Acesso em: 22 out. 2017.

NEVILLE A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. Ed. São Paulo: bookman, 2010.

PEGADA DO LIXO. Disponível em: <www.pegadadelixo.com.br/2016/09/impacto-garrafas-de-cerveja-long-necks>. Acesso em: 27 out. 2017.

PEREIRA, Artur Henrique. **Avaliação da utilização de vidro comum como pozolana e avaliação da utilização de sucata de vidro temperado como agregado graúdo em concretos**. 2016. 46 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

PINHEIRO, Fábio Carlos. **Evolução do uso do vidro como material de construção civil**. 2007. 64 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

PINTO-COELHO, Ricardo Motta. **Reciclagem e desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. Ed. Belo Horizonte: Recóleo, 2009.

RIBEIRO, Anderson Osvaldo. **Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. 86 f. Dissertação. (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, set. 2015.

RIGHI, Débora; KÖHLER, Lucas; TABARELLI, Aline; KIRCHHOF, Larissa; LIMA, Rogério. **Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas**. 2012. Artigo apresentado na XXXV Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural. Disponível em: <[http://docplayer.com.br/26947425 -Analise-de-concretos-produzidos-com-vidro-moido-quando-submetidos-a-elevadas-temperaturas.html](http://docplayer.com.br/26947425-Analise-de-concretos-produzidos-com-vidro-moido-quando-submetidos-a-elevadas-temperaturas.html)>. Acesso em: 22 out. 2017.

SANTOS, A. R. **Vidro – Tecnologias para reciclagem**. Disponível em: <www.reciclagem.pcc.usp.br/vidro.htm>. Acesso em: 29 out. 2017.

SILVA, A. L. B.; PEREIRA, F. F. A.; COSTA, G. L.S.; MARQUES, S. A. **Concreto especial produzido a partir da substituição parcial do cimento Portland por resíduos de vidro**. 2013. Trabalho apresentado no IX Congresso de Iniciação Científica do IFRN. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ocs/index.php/congic/ix/paper/view/1224/123>>. Acesso em: 15 out. 2017.

SILVA, Narciso Gonçalves da; CAMPITELI, Vicente Coney. **Influência dos finos e da cal nas propriedades das argamassas**. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC). Florianópolis - SC, ago. p. 4349-4358. 2006.

SIMÕES, Lorena Jordani; **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. 2013. 142 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SIMÕES, Lorena Jordani; SAUER, Aline Silva; TRISTÃO, Fernando Avancini; CALMON, João Luiz; VIEIRA, Geilma Lima. **Caracterização do resíduo de vidro laminado de para-brisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias**. 2013. Artigo. Disponível em: <http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art5_N22.pdf>. Acesso em: 22 out. 2017.

TIECHER, Franciele. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** 2006. 180 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, fev. 2006.

TORRES, Ariela da Silva. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta-análise.** 2011. 186 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, mar. 2011.

TORRES, Livia Maria Osterne. **Estudo de caso de projeto com utilização de vidro estrutural.** 2015. 54 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, dez. 2015.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Manual técnico do vidro plano para edificações.** 1. Ed. Porto Alegre: Simplissimo, 2016.